



TESIS - TF142520

ANALISIS ABSORPSIFITAS GAS H_2S PADA FILTER PURIFIKASI BIOGAS DENGAN MEMPERGUNAKAN *WET SCRUBBER*

ANITA CATUR TRISNAYANTI
NRP. 2415202342

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA

PROGAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI TERBARUKAN
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Anita Catur Trisnayanti
NRP: 2415 202 342

Tanggal Ujian : 26 Juli 2017
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:

1. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA
NIP: 19650309 199002 1 001
..... (Pembimbing)
2. Gunawan Nugroho, ST, MT, Ph.D
NIP: 19771127 200212 1 002
..... (Penguji)
3. Dr. Ridho Hantoro, ST, MT
NIP: 19761223 200501 1 001
..... (Penguji)
4. Dr. Ing. Doty Dewi Risanti, ST, MT
NIP: 19740903 199802 2 001
..... (Penguji)

Dekan Fakultas Teknologi Industri,



Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST, MT

NIP. 19690507 1995121 001

ANALISIS ABSORPSIFITAS GAS H₂S PADA FILTER PURIFIKASI BIOGAS DENGAN MEMPERGUNAKAN WET SCRUBBER

Nama Mahasiswa : Anita Catur Trisnayanti
NRP. : 2415 202 342
Pembimbing : Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA

ABSTRAK

Kandungan gas CO₂ dan H₂S pada biogas dapat dikurangi dengan menggunakan filter purifikasi pemurnian. Gas tersebut dapat berdampak buruk terhadap ozon (CO₂) dan bersifat korosif (H₂S) terhadap benda logam. Ada berbagai macam metode purifikasi, di antaranya *wet scrubber*, yaitu filter purifikasi gas H₂S melalui kontak biogas dengan air yang disemprotkan. Metode ini dinilai sangat efektif untuk menyerap kandungan gas H₂S dalam biogas. Pada penelitian ini dilakukan pengembangan lanjutan dengan cara memperbesar permukaan kontak dan durasi kontak melalui pengkabutan air yang disemprotkan. Untuk mengetahui efektifitas penyerapan, maka dilakukan modifikasi *wet scrubber* terdahulu dengan mempergunakan alat pengkabutan air yang dilengkapi flow meter untuk mengukur aliran gas *inlet* (gas yang belum dipurifikasi) dan gas *outlet* (gas yang telah dipurifikasi). Percobaan dilakukan dengan cara memvariasikan kecepatan aliran biogas. Kecepatan biogas yang divariasikan mulai dari katup gas terbuka 25% yaitu 11,13 m/s, katup gas terbuka 50% yaitu 2,78 m/s, katup gas terbuka 75% yaitu 1,25 m/s dan katup gas terbuka 100% kecepatannya adalah 0,69 m/s serta kecepatan aliran air yang dikabutkan ke dalam *wet scrubber* konstan yaitu sebesar $5,24 \times 10^{-4}$ m/s. Hasil percobaan menunjukkan pengurangan yang lebih banyak diperoleh dari percampuran antara gas dan air dengan kecepatan biogas sebesar 0,69 m/s dan kecepatan air sebesar $5,24 \times 10^{-4}$ m/s dapat mengurangi kadar H₂S sebesar 58%.

Katakunci : purifikasi biogas, *wet scrubber*, pengkabutan

ABSORPTION ANALYSIS OF GAS H_2S ON BIOGAS PURIFICATION FILTER USING WET SCRUBBER

Name : Anita Catur Trisnayanti
ID Number : 2415 202 342
Supervisor : Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA

ABSTRACT

CO₂ and H₂S gases can be reduced by using biogas purification filters. Those gas are bad for ozone layers (CO₂) and corrosive to metal (H₂S). There are various methods of purification such as wet scrubber, which is a purification filter of H₂S by contacting the biogas against sprayed water. To gain more effectiveness in absorption, the previous water sprayed purification was modified by using atomized water equipped with flow meter to measure the flow of the fresh gas at inlet (the gases that has not been purified) and outlet (the gases that has been purified). This paper will explain a further development of purification filter using atomized water to reduce the H₂S content in biogas. The aims of using atomized water are to enlarge the contact surface and increase duration contact between biogas and water. This experiment was conducted by varying the valve opening in purification of 25%, 50%, 75%, and 100% so the flow of biogas velocity will vary i.e. 11,13 m/s, 2,78 m/s, 1,25 m/s and 0.69 m/s respectively. For a constant atomized water flow of $5,24 \times 10^{-4}$. The result shows that the highest reduction (58%) of H₂S content is achieved in 100% valve opening.

Keywords: *biogas, biogas purification, wet scrubber, atomized*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena dengan berkah dan limpahan rahmat serta hidayahNya, sehingga tesis yang berjudul “Analisis Absorpsifitas Gas H₂S Pada Filter Purifikasi Biogas Dengan Mempergunakan Wet Scrubber” ini dapat penulis selesaikan.

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang keahlian Rekayasa Energi Terbarukan pada program studi Pascasarjana Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penulisan suatu karya ilmiah tidaklah mudah, oleh karena itu tidak tertutup kemungkinan dalam penyusunan tesis ini terdapat kekurangan, sehingga penulis sangat mengharapkan masukan, saran, dan kritikan yang bersifat membangun guna kesempurnaan tesis ini.

Proses penyusunan tesis ini tidak terlepas dari berbagai rintangan, mulai dari pengumpulan literatur, pengumpulan data sampai pada pengolahan data maupun dalam tahap penulisan. Namun dengan kesabaran dan ketekunan yang dilandasi dengan rasa tanggung jawab selaku mahasiswa dan juga bantuan dari berbagai pihak, baik material maupun moril.

Olehnya itu dalam kesempatan ini izinkanlah penulis mengucapkan Jazakumullahu Khairan katsira kepada yang terhormat:

1. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA atas bimbingan, arahan dan waktu yang telah diluangkan kepada penulis untuk berdiskusi selama menjadi dosen pembimbing.
2. Bapak Gunawan Nugroho, ST, MT, Ph.D., Bapak Dr. Ridho Hantoro, ST, MT., Ibu Dr. Ing. Doty Dewi Risanti, ST, MT., yang telah memberikan masukan dan saran pada saat seminar proposal dan seminar hasil tesis.
3. Ketua program studi Pascasarjana Teknik Fisika Bapak Dr.rer.nat.Ir. Aulia M. T. Nasution MSc.,
4. Seluruh Dosen program Pascasarja Teknik Fisika khususnya dosen Rekayasa Energi Terbarukan yang telah memberikan arahan dan bimbingan untuk mendalami ilmu Rekayasa Energi Terbarukan.
5. Pimpinan dan staf Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia di Jember yang telah membantu dalam proses pengambilan data penelitian.
6. Kedua orang tuaku tercinta, ayahanda Usman Effendi dan ibunda Illa Isihati yang telah mencurahkan seluruh cinta, kasih sayang, cucuran keringat dan air mata, untaian doa serta pengorbanan tiada henti, yang hingga kapanpun penulis takkan bisa membalasnya. Maafkan jika ananda sering menyusahkan,

merepotkan, serta melukai perasaan ibunda dan ayahanda. Keselamatan dunia akhirat semoga selalu untukmu. Semoga Allah selalu menyapamu dengan Cinta-Nya.

7. Seluruh Keluarga besarku yang senantiasa memberikan motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan studi, serta kakak-kakak penulis yang telah mencurahkan kasih sayang, dorongan semangat. Mas Arip, Mas Agung, dan Kiki yang selalu menemani penulis dalam duka, canda dan tawa. Semoga kalian menjadi orang yang dibanggakan.
8. Rekan-rekan mahasiswa pascasarjana Teknik Fisika : Mbak Tiwi, Erna, Mbak Masru, Mbak Nike, Mas Feri, Coker, Angga, dan seluruh rekan mahasiswa pascasarjana Teknik Fisika angkatan 2015.
9. Admin TU Pascasarjana Teknik Fisika Mbak Martha Hardiyah yang senantiasa memberikan pelayanan administrasi yang memuaskan.
10. Kepada semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Selain itu, penulis juga mengucapkan permohonan maaf yang sedalam-dalamnya jika penulis telah banyak melakukan kesalahan dan kekhilafan, baik dalam bentuk ucapan maupun tingkah laku, semenjak penulis menginjakkan kaki pertama kali di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga selesainya studi penulis. Semua itu adalah murni dari penulis sebagai manusia biasa yang tak pernah luput dari kesalahan dan kekhilafan. Adapun mengenai kebaikan-kebaikan penulis, itu semata-mata datangnya dari Allah SWT, karena segala kesempurnaan hanyalah milik-Nya

Akhirnya, penulis berharap bahwa apa yang disajikan dalam tesis ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan. Semoga kesemuanya ini dapat bernilai ibadah di sisi-Nya, Aamiin!

Surabaya, Agustus 2017

Anita Catur Trisnayanti

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Penelitian	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	5
2.1 Definisi dan Kandungan Biogas.....	5
2.3 Reaksi CH_4 dan H_2O	6
2.4 Filter CO_2 dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$	7
2.5 Gas Hidrogen Sulfida (H_2S) dalam Biogas	8
2.6 Proses Pemurnian Biogas	11
2.7 Prinsip Kerja <i>Wet Scrubber</i>	14
2.8 <i>Particulate Matter</i> (PM).....	22
2.9 Mekanisme Absorpsi <i>Wet Scrubber</i>	24
2.10 Difusi dan Transfer Massa	25
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Diagram Alir Penelitian	31
3.2 Perlengkapan Alat Uji	34
3.3 Design <i>Wet Scrubber</i> dengan sistem pengkabutan	35
3.4 Metode Pengumpulan dan Analisis Data	38
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	41

4.1 Data Pengukuran H ₂ S dan Analisis Hasil Pengukuran.....	42
4.2 Analisis <i>Wet Scrubber</i>	46
BAB 5 KESIMPULAN	49
DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN A.....	55
LAMPIRAN B.....	57
LAMPIRAN C	59
LAMPIRAN D.....	61
LAMPIRAN E	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Teknologi purifikasi gas	13
Gambar 2.2 Skema kolom <i>wet scrubber countercurrent</i>	16
Gambar 2.3 Garis operasi dan ekuilibrium dari proses absorpsi.....	16
Gambar 2.4 <i>Spray tower</i>	17
Gambar 2.5 <i>Cyclonic spray scrubber</i>	18
Gambar 2.6 <i>Orifice scrubber</i>	19
Gambar 2.7 <i>Impingement plate scrubbers</i>	19
Gambar 2.8 <i>Venturi throat configurations</i>	20
Gambar 2.9 <i>Mechanically induced spray scrubber</i>	21
Gambar 2.10 <i>Centrifugal fan scrubber</i>	21
Gambar 2.11 Ukuran partikel.....	23
Gambar 2.12 proses impaksi dan difusi	25
Gambar 2.13 Variasi jarak antara dua molekul yaitu kecepatan yang berbeda dengan waktu dalam sistem biner	26
Gambar 2.14 Butiran air atau partikel pada aliran fluida	26
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	31
Gambar 3.2 pemasangan alat purifikasi biogas sebelum <i>redesign</i>	32
Gambar 3.3 Spesifikasi alat purifikasi sebelum <i>redesign</i>	34
Gambar 3.4 Skema pengujian purifikasi biogas.....	35
Gambar 3.5 kolom adsorber gas CO ₂	35
Gambar 3.6 kolom <i>wet scrubber</i>	36
Gambar 3.7 <i>Nozzle</i>	36
Gambar 3.8 <i>Blower</i>	37
Gambar 3.9 Pemasangan uji alat purifikasi biogas	37
Gambar 3.10 Perancangan alat purifikasi	38
Gambar 4.1 Grafik hasil pengukuran kadar H ₂ S.....	42
Gambar 4.2 Grafik besarnya H ₂ S yang tereduksi sesuai dengan bukaan <i>valve</i>	43
Gambar 4.3 Grafik hubungan kecepatan gas terhadap selisih kadar H ₂ S	45

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi biogas	5
Tabel 2.2 Nilai kalor biogas	6
Tabel 2.3 Properti dari metana (CH ₄).....	7
Tabel 2.4 Tingkat konsentrasi H ₂ S dan efek pada manusia	9
Tabel 2.5 Efek pengotor pada biogas	12
Tabel 2.6 Hubungan antara variasi konsentrasi pada sistem multikomponen	28
Tabel 4.1 Data hasil pengukuran H ₂ S menggunakan GC	41

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Biogas adalah sumber energi terbarukan dan berkelanjutan yang dihasilkan oleh fermentasi anaerobik bahan organik. Pendekatan alternatif yang dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir yang dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir adalah peningkatan biogas dan pemanfaatannya sebagai pengganti gas alam di rumah tangga dan industri atau sebagai bahan bakar kendaraan [1,2]. Meskipun dalam beberapa tahun terakhir beberapa prosedur peningkatan biogas telah dikembangkan, banyak upaya pengoptimalan masih harus dilakukan untuk mengubah biogas yang ditingkatkan menjadi pembawa energi yang kompetitif dan kompetitif.

Peningkatan kualitas biogas dengan beberapa perlakuan yaitu dengan cara mereduksi kadar hidrogen sulfur (H_2S) dan karbon dioksida (CO_2). Hal ini didasarkan pada beberapa hal, antara lain hidrogen sulfur mengandung racun dan zat yang menyebabkan korosi. Jika biogas mengandung senyawa ini, maka akan menimbulkan gas yang berbahaya, kandungan hidrogen sulfur lebih berbahaya karena akan membentuk senyawa baru bersama oksigen berupa sulfur dioksida (SO_2) atau sulfur trioksida (SO_3). Kedua senyawa itu lebih berbahaya daripada H_2S . Apabila biogas yang masih mengandung H_2S digunakan sebagai proses pembakaran maka akan terbentuk senyawa asam sulfur (H_2SO_4) yang bersifat lebih korosif dari H_2S . Sedangkan karbon dioksida (CO_2) memiliki sifat yang dapat menghambat proses pembakaran. Jadi apabila biogas masih mengandung CO_2 dalam jumlah yang besar maka akan menjadikan pembakarannya tidak sempurna [3]. Selain karena bersifat korosif, H_2S merupakan unsur kecil penyusun biogas yang dapat berdampak buruk bagi kesehatan manusia. Sehingga unsur H_2S merupakan unsur yang tidak diinginkan dalam pemanfaatan biogas.

Biogas digunakan untuk produksi panas, uap, listrik serta bahan bakar kendaraan untuk diinjeksikan ke gas alam [4]. Meskipun secara substansial nilai kalor biogas lebih rendah dari bahan bakar umum lainnya, karena tidak adanya

proses kompresi dalam produksinya, biogas memiliki nilai kalor yang cukup baik yaitu sebesar 5000 kcal/m³ [5]. Umumnya biogas terdiri dari CH₄ dan CO₂ dengan perbandingan 3:1. Pada prakteknya, untuk aktivitas bidang minyak dan gas kondisi tersebut dapat terjadi pada pipa-pipa saluran atau pada tangki-tangki logam karena adanya unsur H₂S, sehingga diperlukan penanganan khusus untuk menghindari korosi yang berakibat pada keretakan atau kebocoran. Selain H₂S dapat menyebabkan karat besi/ferrous sulfide (FeS). FeS juga bersifat *phyroporic*, yang jika bereaksi dengan oksigen di udara akan menghasilkan panas [6].

Abatzoglou dan Boivin menyatakan bahwa mengurangi CO₂ dan konten H₂S secara signifikan akan meningkatkan kualitas biogas [7]. Beberapa penelitian sebelumnya telah dikaji dengan menggunakan beberapa metode atau cara untuk proses pemurnian biogas antara lain penelitian dari Bartocci [8] pada eksperimennya terhadap filter purifikasi biogas menggunakan 2 *wet scrubber*, masing-masing menggunakan pompa untuk menambah tekanan pada *wet scrubber*. Pada eksperimennya dapat menambah efisiensi hingga 89%. Seperti halnya Lin [9] melakukan penelitian tentang perancangan filter purifikasi dengan sistem *wet scrubber* yang mampu menyerap H₂S pada biogas mentah dari 986 ppm menjadi 112 ppm. Pada proses purifikasi, biogas dikompresi menggunakan pompa berkapasitas 1100 liter perjam yang disemprotkan melalui *nozzle*.

Eksperimen dari Shah dkk [10] juga melakukan penelitian pada filter purifikasi biogas menggunakan 1 pompa yang digunakan pada proses purifikasi biogas. Pada penelitian ini dapat menghilangkan kandungan CO₂ sebesar 5,02% dari kandungan CO₂ sebesar 32,01%. Dari beberapa eksperimen sebelumnya kita ketahui bahwa tekanan antara absorben dan gas yang ingin di murnikan sangat berpengaruh terhadap hasil purifikasi biogas. Penelitian oleh Metty dkk [11] pemurnian biogas dari gas pengotor hidrogen sulfida dengan menggunakan limbah geram besi. Limbah gram besi dikumpulkan dan dipilih yang berbentuk spiral dan panjang. Hingga volume 300 liter proses pemurnian biogas terjadi peningkatan persentase penurunan kadar H₂S dengan pencapaian tertinggi pada volume 80 liter terjadi penurunan 75,9 ppm atau dalam persentase 93,59 % dan

penurunan terendah pada volume 250 liter yaitu 13,6 ppm atau dalam persentase 14,80 %.

Terdapat beberapa metode pemurnian biogas, di antaranya adalah absorpsi fisis, absorpsi kimia, adsorpsi permukaan padatan, metode *cryogenic*, metode konversi kimia dan pemisahan dengan membran [8]. Masing-masing metode tersebut memiliki keunggulan dan kekurangan dari sisi proses, ekonomi, bahan baku, teknologi dan pengoperasian. Karena sebagian besar daerah produsen biogas dari kotoran ternak berada di pedesaan, maka dibutuhkan cara yang efektif, ekonomis, dan sederhana untuk aplikasi pemurnian biogas.

Wet scrubber merupakan komponen utama dalam pemurnian biogas. Aliran biogas yang masuk ke dalam kolom pemurnian akan disirkulasi menggunakan uap air tanpa adanya penambahan volume air. Menurut Krischan dkk [12] efisiensi pemisahan didefinisikan sebagai perbedaan kandungan H_2S antara saluran masuk dan saluran keluar dengan kandungan H_2S pada saluran masuk *scrubber*. Metode pemurnian H_2S dengan *wet scrubber* dapat terjadi karena H_2S mempunyai kelarutan yang tinggi dalam air, yaitu sekitar 3,5 gram gas per kg air pada suhu kamar. Sedangkan tingkat kelarutan CH_4 oleh air sangat rendah, yaitu sekitar 0,02 gram gas per kg air pada suhu kamar. Metode lain yang dapat digunakan untuk pemurnian biogas adalah dengan menggunakan teori absorber.

Dari beberapa penelitian sebelumnya, sebagian besar proses pemurnian biogas membutuhkan energi yang tinggi. Sistem purifikasi sebelumnya menggunakan pompa untuk menambah tekanan. Penambahan tekanan yang tinggi pada sistem purifikasi yang menyebabkan kontak antara air dan biogas lebih cepat. Pada penelitian ini melakukan purifikasi biogas menggunakan *wet scrubber* dengan metode pengkabutan. Kontak air dengan biogas yang semakin lama akan menyebabkan penyerapan H_2S pada biogas lebih optimal. Saat ini belum dikembangkan proses pemurnian biogas menggunakan metode *wet scrubber* dengan pengkabutan air. Metode ini mampu meningkatkan durasi kontak air terhadap biogas menjadi lebih lama. Pada penelitian ini dirancang alat pemurnian biogas menggunakan metode pengkabutan dengan *wet scrubber* dan dilakukan analisis terhadap gas yang dihasilkan. Alat purifikasi ini dilengkapi dengan

metode adsorber CaO, yang mampu mereduksi kadar CO₂. Namun, penelitian ini hanya berfokus pada penurunan kadar H₂S. Selanjutnya, nilai pengurangan H₂S diobservasi secara berkala dengan variasi kecepatan biogas yang dipurifikasi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, permasalahan dalam tesis ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana desain filter gas H₂S pada biogas dengan metode pengkabutan *wet scrubber*?
2. Bagaimana mendapatkan perbandingan debit biogas dan *water spray* yang menghasilkan absorpsi terbaik?

1.3 Batasan Penelitian

Batasan masalah pada penelitian ini diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan biogas hasil ekstraksi kotoran sapi di ICCRI Jember sebagai sumber biogas yang akan dimurnikan
2. Menggunakan Filter Biogas hasil desain ulang yaitu merubah air yang di semprotkan dalam bentuk kabut
3. Pemfilteran hanya dilakukan terhadap kandungan gas H₂S
4. Debit air yang disemprotkan dijaga agar tetap konstan. Sedangkan debit biogas yang diinjeksikan, divariasikan dengan mengubah prosentase bukaan valve.
5. Analisis efektifitas alat purifikasi biogas menggunakan metode pengkabutan *wet scrubber* berfokus pada reduksi H₂S.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Melakukan pendesainan ulang filter *wet scrubber* agar memiliki kinerja lebih baik absorpsi gas H₂S.
2. Mendapatkan perbandingan kecepatan biogas dan *water spray* optimal.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Definisi dan Kandungan Biogas

Biogas adalah gas yang dihasilkan oleh proses fermentasi anaerob menggunakan biomassa seperti kotoran ternak, limbah pabrik, sampah organik. Proses fermentasi anaerob adalah proses mikrobiologis menghasilkan biogas tanpa menggunakan udara [13]. Biogas sebagian besar mengandung 50-70% gas metana (CH_4) dan 30- 40% karbondioksida (CO_2), dan beberapa kandungan gas yang jumlahnya kecil diantaranya hidrogen (H_2) sebesar 5-10%, hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3) serta nitrogen (N) yang kandungannya sangat kecil. Energi yang terkandung dalam biogas tergantung dari konsentrasi metana (CH_4). Semakin tinggi kandungan metana maka semakin besar kandungan energi (nilai kalor) pada biogas, dan sebaliknya semakin kecil kandungan metana (CH_4) semakin kecil nilai kalor [14].

Biogas berbasis kotoran sapi mempunyai unsur-unsur di dalamnya. Tabel 2.1 dibawah ini menunjukkan masing-masing konsentrasi pada komposisi biogas. Tabel 2.1 Komposisi biogas [15]

Jenis gas	Jumlah (%)
Methan (CH_4)	65,7
Karbon diokasida (CO_2)	27
Nitrogen (N_2)	2,3
Karbon monoksida (CO)	0
Oksigen (O_2)	1
Propana (C_3H_8)	0,7
Hidrogen sulfida (H_2S)	tidak terukur
Nilai Kalor	6513 kkal/ m^3
Total gravitasi jenis (udara=1)	0,838

2.2 Nilai Kalor Pembakaran Biogas

Nilai kalor gas metana adalah 20 MJ/ m^3 dengan efisiensi pembakaran 60% pada konvesional kompor biogas. Selain dimanfaatkan untuk bahan bakar memasak, biogas sangat potensial sebagai sumber energi terbarukan karena nilai kalor pada gas metananya tersebut, sehingga biogas dapat dimanfaatkan untuk

penerangan, proses pengeringan, untuk proses penghasil panas, untuk kendaraan bermotor dan pembangkit tenaga listrik [16].

Energi biogas mengandung nilai kalori lebih dari bahan bakar lainnya, artinya akan lebih banyak panas yang dihasilkan untuk memasak sehingga proses memasak semakin cepat. Dalam pemakaian biogas, bau bahan baku akan berkurang karena proses penguraian bahan organik yang berlangsung. Selain itu, biogas menghasilkan sedikit asap jika dibandingkan dengan kayu bakar dan efek pencemaran udara dapat dikurangi. 1 m³ biogas setara dengan 0,56 kg gas elpiji, 0,62 liter minyak tanah, 0,52 liter minyak solar atau 3,50 kg kayu bakar [17].

Nilai kalor bahan bakar dapat dibedakan menjadi dua golongan berdasarkan fasa salah satu produk pembakaran yaitu air (H₂O), yaitu:

1. HHV (*Higher Heating Value*) Suatu besaran yang menyangkut bahan bakar yang mengandung hidrogen di mana air yang terbentuk dalam produk pembakaran berbentuk fase cair.
2. LHV (*Lower Heating Value*) Suatu besaran yang menyangkut bahan bakar yang mengandung hidrogen: di mana air yang terbentuk dalam produk pembakaran berbentuk fase uap.

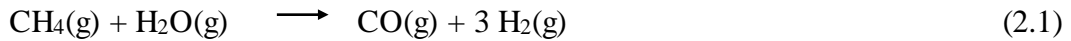
Nilai kalor pembakaran yang terdapat pada biogas berupa *High Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value* (LHV) pembakarannya dapat diperoleh dari tabel berikut:

Tabel 2.2 Nilai kalor biogas [18]

Component	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄
HHV (kJ/Nm ³)	12475	12633	39819	70293	63414
LHV (kJ/Nm ³)	10783	12633	35883	64345	59457

2.3 Reaksi CH₄ dan H₂O

CH₄ adalah salah satu gas yang termasuk kedalam golongan gas rumah kaca bersama dengan CO₂ dan H₂O. Gas rumah kaca akan menyerap dan meneruskan panas radiasi dari matahari serta dengan memantulkan balik radiasi gelombang panjang yang dilepaskan pada permukaan bumi sehingga bumi mendapatkan pemanasan dua kali. Pada konsentrasi CH₄ yang lebih kecil dari konsentrasi CO₂, efektifitas CH₄ dalam menangkap panas kira-kira 25 kali lebih besar dari pada CO₂.



Sebagai komponen utama gas alam metana adalah sumber bahan bakar utama. Pembakaran satu molekul metana dengan oksigen akan melepaskan satu molekul CO_2 (karbondioksida) dan dua molekul H_2O (air):



Tabel 2.3 Properti dari metana (CH_4) [19]

Sifat	
Rumus kimia	CH_4
Massa molar	$16,04 \text{ g mol}^{-2}$
Penampilan	Gas tidak berwarna
Bau	Tidak berbau
Densitas	$655,6 \mu \text{ g cm}^{-3}$
Kelarutan dalam air	35 mg dm^{-3} (at 17°C)
Log P	1,09
Termokimia	
Entalpi pembentukan standar ($\Delta_f H^\circ_{298}$)	$-74,87 \text{ kJ mol}^{-1}$
Entalpi pembakaran standar ($\Delta_c H^\circ_{298}$)	$-891,1 \text{ kJ mol}^{-1}$
Entropi molar standart (S°_{298})	$186,25 \text{ kJ mol}^{-1}$
Kapasitas panas, C	(Heat capacity)

Metana digunakan dalam proses industri kimia dan dapat diangkut sebagai cairan yang dibekukan (gas alam cair, atau LNG). Ketika dalam bentuk cairan yang dibekukan, metana akan lebih berat daripada udara karena gas metana yang didinginkan akan mempunyai massa jenis yang lebih besar. Metana yang berada pada suhu ruangan biasa akan lebih ringan daripada udara. Gas alam, yang sebagian besar adalah metana, biasanya didistribusikan melalui jalur pipa.

2.4 Filter CO_2 dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Menurut Nadliriyah dan Triwikantoro [20] bahwa absorpsi dapat dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu absorpsi fisika yang disebabkan oleh gaya Van der Waals (penyebab terjadinya kondensasi untuk membentuk cairan yang ada pada permukaan absorben) dan absorpsi kimia (terjadi reaksi antara zat yang diserap oleh absorben, banyaknya zat yang terabsorpsi tergantung pada sifat khas zat tersebut). Besar kecilnya absorpsi dipengaruhi oleh macam absorben, macam zat yang terabsorpsi, konsentrasi absorben dan zat, luas permukaan, temperatur

dan tekanan zat yang terabsorpsi. Absorpsi digunakan untuk menyatakan bahwa ada zat lain yang terserap pada zat itu, misalnya karbon aktif dapat menyerap molekul-molekul asam asetat dalam larutannya. Tiap partikel absorban dikelilingi oleh molekul yang diserap karena terjadi interaksi tarik-menarik.

Absorpsi dapat dilakukan dengan menambahkan senyawa yang mampu mengikat gas yang tidak diperlukan yaitu dengan senyawa alkali, seperti larutan Ca(OH)_2 sesuai dengan persamaan reaksi berikut:



Ca(OH)_2 disebut batu gamping dan merupakan basa dengan kekuatan sedang dibandingkan larutan NaOH . Larutan tersebut bereaksi hebat dengan berbagai asam, dan bereaksi dengan banyak logam dengan adanya air. Larutan tersebut menjadi keruh bila dilewatkan karbon dioksida, karena mengendapnya kalsium karbonat [11].

2.5 Gas Hidrogen Sulfida (H_2S) dalam Biogas

Hidrogen sulfida (H_2S) merupakan gas pengotor yang terdapat dalam gas-gas komersial. Hidrogen sulfida merupakan gas yang berbau dan mematikan serta sangat korosif bagi berbagai jenis logam, sehingga membatasi penggunaannya untuk bahan bakar pada mesin. Gas ini dapat membahayakan bagi kesehatan manusia jika terhirup dalam ambang batas konsentrasi tertentu. Balas [21] juga berpendapat bahwa sulfur juga berpotensi berbahaya untuk jenis tertentu dari katalis, bahkan dalam konsentrasi rendah (ppm). Hasil pembakaran gas yang mengandung H_2S menghasilkan belerang dan asam sulfat yang sangat korosif terhadap logam. Kandungan H_2S mencapai 200 ppm dapat menyebabkan kematian dalam waktu 30 menit. Standar keamanan dan kesehatan memberikan ijin maksimum pada tingkat 20 ppm. Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes) No 416/Menkes/PER/IX/1990 menyatakan bahwa batas maksimum konsentrasi gas hidrogen sulfida pada air minum yang diizinkan hanya 0,05 mg/liter. Sedangkan untuk kadar H_2S dalam produk gas, nilai yang diijinkan adalah maksimum sebesar 5 ppm. Untuk menghindari dari hal yang merugikan dan membahayakan tersebut maka dibutuhkan suatu instrument untuk mendeteksi secara dini konsentrasi hidrogen sulfide (H_2S) yang ada di lingkungan sekitar.

Jika hidrogen sulfida yang terkandung dalam biogas terbakar maka akan berubah menjadi sulphur oksida yang akan menyebabkan korosi pada komponen yang terbuat dari logam dan membuat minyak pelumas mesin menjadi asam jika digunakan misalnya pada mesin CHP (*Combines Heat and Power Generation*). Agar dapat mencegah kerusakan yang ditimbulkan oleh hidrogen sulfida maka gas ini harus dihilangkan atau minimal dikurangi kandungannya.

Gas H₂S mempunyai sifat dan karakteristik antara lain :

- Tidak berwarna tetapi mempunyai bau khas seperti telur busuk pada konsentrasi rendah yaitu 0,13-30 ppm, sehingga sering disebut sebagai gas telur busuk.
- Merupakan jenis gas beracun.
- Dapat terbakar dan meledak pada konsentrasi LEL (*Lower Explosive Limit*) 4.3% (43000 ppm) sampai UEL (*Upper Explosive Limite*) 46% (460000 ppm) dengan nyala api berwarna biru pada temperature 500 °F (260 °C)
- Berat jenis gas H₂S lebih berat dari udara sehingga gas H₂S akan cenderung terkumpul di tempat / daerah yang rendah. Berat jenis gas H₂S sekitar 20% lebih berat dari udara dengan perbandingan berat jenis H₂S : 1.2 atm dan berat jenis udara : 1 atm.
- H₂S dapat larut (bercampur) dengan air (daya larut dalam air 437 ml/100 ml air pada 0 °C; 186 ml/100 ml air pada 40°C).
- H₂S bersifat korosif sehingga dapat mengakibatkan karat pada peralatan logam.

Tabel 2.4 Tingkat konsentrasi H₂S dan efek pada manusia [22]

Tingkat H₂S (ppm)	Efek pada Manusia
0,13	Bau minimal yang masih tercium
4,6	Mudah dideteksi, bau yang sedang
10	Pemulaan iritasi mata dan mulai berair
27	Bau yang tidak enak dan tidak dapat ditoleransi lagi
100	Batuk-batuk, iritasi mata dan indera penciuman sudah tidak berfungsi
200-300	Pembengkakan mata dan rasa kekeringan di tenggorokan
500-700	Kehilangan kesadaran dan bisa mematikan dalam waktu 30-1 jam
> 700	Kehilangan kesadaran dengan cepat dan berlanjut kematian

Efek fisik gas H₂S terhadap manusia tergantung dari beberapa faktor, diantaranya adalah :

- a. Lamanya seseorang berada di lingkungan paparan H₂S.
- b. Frekuensi seseorang terpapar.
- c. Besarnya konsentrasi H₂S.
- d. Daya tahan seseorang terhadap paparan H₂S.

Adapun acuan dasar pengendalian nilai H₂S didasarkan pada ACGIH (*American Conference Of Governmental Industrial Hygienists*) sebagai berikut:

- Nilai ambang batas (TLV-TWA / *Threshold Limit Value-Time Weighted Average*) H₂S adalah 10 ppm, yang didefinisikan sebagai konsentrasi rata-rata yang diperkenankan untuk pemaparan selama 8 jam sehari atau 40 jam seminggu. Pekerja dapat terpapar secara berulang tanpa menimbulkan gangguan kesehatan pada konsentrasi 10 ppm (*Occupational Exposure Limit for Chemical Substances*).
- Sedangkan nilai ambang batas yang merekomendasikan bahwa pekerja tidak boleh terpapar H₂S untuk jangka waktu maksimal 15 menit adalah bila paparan melebihi 20 ppm atau yang disebut dengan TLV – STEL (*Threshold Limit Value – Short Term Exposure Limit*).

Konsentrasi H₂S yang sangat rendah yaitu konsentrasi dibawah level beracun dapat di deteksi pada konsentrasi yang sangat rendah yaitu 0,01 ppm, akan tetapi limit pemaparan oleh para profesional resiko kesehatan atau nilai ambang batas limit yang direkomendasikan oleh ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienist*) untuk senyawa ini adalah 10 ppm. Bau seperti telur busuk tidak begitu penting menjadi suatu indikator sebuah efek potensi kesehatan. Hidung merupakan organ yang tidak layak dalam melakukan penyaringan untuk menetapkan ada atau tidaknya suatu resiko kesehatan, perlu dilakukan pengukuran. Jadi untuk menetapkan adanya suatu resiko kesehatan oleh adanya bau dari H₂S tidak hanya dilakukan penyaringan hanya melalui penciuman, akan tetapi harus dilakukan pengukuran konsentrasi H₂S dan selanjutnya dilakukan analisis resiko kesehatan.

Menurut Kampa dan Arrofiq [23] pada konsentrasi 50-100 ppm H₂S dapat menyebabkan asfiksia dan gangguan iritasi selaput membran penyebab

conjungtivitis, pusing, berasa mau muntah, batuk dan *dizzines*. Pada konsentrasi 300 ppm dapat menyebabkan gagal jantung. Gas H₂S mempunyai efek jangka panjang yang sulit untuk diketahui. Gangguan kesehatan menurut IPCS diantaranya adalah gagal jantung, hyperpnoea, apnoea, asphyxia, iritasi mata, somnolence, pusing, kurang inisiatif, irritability, anxiety, daya ingat berkurang, penurunan libido, bingung, vertigo, dan agitation. Efek kesehatan yang dapat bervariasi tergantung pada tingkat dan durasi paparan. Paparan berulang dapat menyebabkan efek kesehatan yang terjadi pada tingkat yang sebelumnya ditoleransi tanpa efek apapun.

Selain berpengaruh dan menimbulkan bahaya bagi kesehatan manusia H₂S juga berpengaruh terhadap peralatan logam karena H₂S bersifat korosif pada logam. Pada prakteknya untuk aktivitas bidang minyak dan gas, kondisi tersebut dapat terjadi pada pipa-pipa saluran atau pada tangki-tangi logam, sehingga diperlukan penanganan khusus untuk menghindari korosi yang akan berakibat pada keretakan atau kebocoran. Selain itu H₂S juga akan menyebabkan karat besi Sulfida/Ferrous sulfide (FeS) pada logam besi. FeS tersebut bersifat phyroporic, yang jika bereaksi dengan oksigen di udara akan menghasilkan panas. Maka penghilangan H₂S merupakan suatu keharusan untuk setiap pemanfaatan biogas [24].

Salah satu pertimbangan yang dapat dikembangkan untuk menghilangkan gas H₂S dari biogas adalah dengan mempertimbangkan penggunaan reaksi penyerapan oleh H₂O yang dikabutkan. Dengan reaksi ini maka hydrogen sulfida akan diserap ke dalam air. Dengan menggunakan proses ini maka H₂S dikonversikan menjadi asam sulfat berdasarkan reaksi di bawah ini:



2.6 Proses Pemurnian Biogas

Adapun unsur- unsur yang terkandung dalam biogas yaitu gas metana (CH₄), gas karbon dioksida (CO₂), gas oksigen (O₂), gas hidrogen sulfida (H₂S), gas hidrogen (H₂), dan gas karbon monoksida (CO). Dari semua unsur tersebut yang berperan dalam menentukan kualitas biogas yaitu gas metana (CH₄) dan gas karbon dioksida (CO₂). Price dan Cheremisinoff berpendapat bahwa apabila kadar

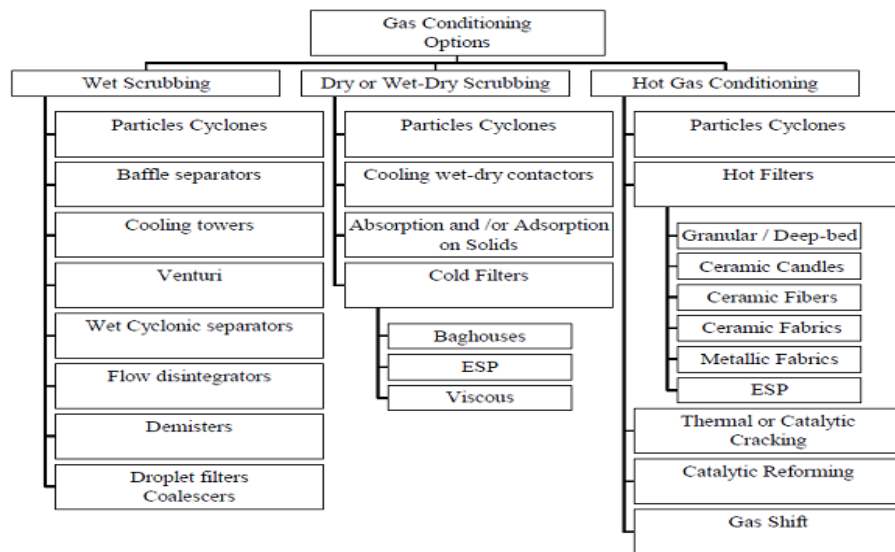
CH₄ tinggi maka biogas tersebut akan memiliki nilai kalor yang tinggi. Sebaliknya jika kadar CO₂ yang tinggi maka akan mengakibatkan nilai kalor biogas tersebut rendah. Maka dari itu untuk meningkatkan nilai kalor biogas maka kadar gas CO₂ harus rendah. Kandungan gas metana (CH₄) dari biogas dapat ditingkatkan dengan cara memisahkan gas karbon dioksida (CO₂) dan gas hidrogen sulfida (H₂S) yang bersifat korosif dari biogas.

Tabel 2.5 Efek pengotor pada biogas [25]

Komponen	Persentase	Efek
CO ₂	25-50 %	<ul style="list-style-type: none"> - Mengurangi nilai panas pembakaran - Menyebabkan korosi (kandungan asam karbon) jika gas cukup basah - Meningkatkan knocking pada mesin
H ₂ S	0-0,5 %	<ul style="list-style-type: none"> - Menyebabkan korosi pada peralatan dan sistem pemipaan - Menyebabkan emisi SO₂ - Merusak katalis
NH ₃	0-0,05%	<ul style="list-style-type: none"> - Emisi NO_x setelah pembakaran - Meningkatkan knocking pada mesin
Uap air	1-5 %	<ul style="list-style-type: none"> - Menyebabkan korosi pada peralatan dan sistem pemipaan
Debu	5 µm	<ul style="list-style-type: none"> - Menutup nozzle

Menurut Kapdi dkk [26] ada beberapa metode pemurnian biogas antara lain: absorpsi fisika, absorpsi kimia, adsorpsi, pemisahan dengan membran, cryogenic dan konversi kimia menjadi senyawa lain. Absorpsi adalah pemisahan suatu gas tertentu dari campuran gas-gas dengan cara pemindahan massa ke dalam suatu liquid.

Hal ini dilakukan dengan cara mengantarkan aliran gas dengan liquid yang mempunyai selektivitas pelarut yang berbeda dari gas yang akan dipisahkannya. Selain pemurnian menggunakan absorpsi fisika, absorpsi kimia, adsorpsi, pemisahan dengan membran, cryogenic dan konversi kimia menjadi senyawa lain, ada pilihan untuk pemurnian gas ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Teknologi purifikasi gas [27]

2.7 Proses Absorpsi

Absorpsi merupakan proses yang terjadi ketika suatu komponen gas (absorbat) berdifusi ke dalam cairan (absorben) dan membentuk suatu larutan. Prinsip dasar dari absorpsi adalah memanfaatkan besarnya difusivitas molekul-molekul gas pada larutan tertentu dan dapat dilakukan pada gas-gas atau cairan yang relatif berkonsentrasi rendah maupun yang berkonsentrasi tinggi (konsentrat). Campuran gas apabila dikontakkan dengan cairan yang mampu melarutkan salah satu komponen dalam gas tersebut dan keduanya dikontakkan dalam jangka waktu yang cukup lama pada suhu tetap, maka akan terjadi suatu kesetimbangan dimana tidak terdapat lagi perpindahan massa.

Gas yang terlibat dalam proses absorpsi jika memiliki tekanan parsial kurang dari atm maka proses absorpsi yang berlangsung memenuhi hukum Henry [28] dimana,

$$p^* = H \cdot X \quad (2.5)$$

Dimana:

P^* : tekanan parsial gas terlarut pada kondisi ekuilibrium atau tekanan uap gas terlarut (bar)

H : konstanta Henry yang berbeda untuk setiap kelarutan gas

X : fraksi mol gas yang terlarut dalam larutan

Sedangkan tekanan parsial gas merupakan fungsi dari komposisi gas itu sendiri dimana,

$$p = y \cdot P \quad (2.6)$$

Dimana:

p : tekanan parsial gas (bar)

y : fraksi mol gas

P : tekanan gas total (bar)

Proses absorpsi bisa berlangsung, yang ditandai dengan terjadinya transfer zat terlarut (gas) dari fase gas ke fase cair, apabila tekanan parsial gas (p) lebih besar daripada tekanan uap gas terlarut (p*). Jika tekanan uap gas terlarut sama dengan tekanan parsial gas maka tidak terjadi proses absorpsi.

2.7 Prinsip Kerja *Wet Scrubber*

Sistem *scrubber* merupakan kumpulan berbagai macam alat kendali polusi udara yang dapat digunakan untuk membuang partikel-partikel dan membuang unsur unsur yang tidak dibutuhkan dari biogas atau gas keluaran industri. *Scrubber* merupakan peralatan yang berkaitan dengan kontrol polusi yang menggunakan liquid untuk mencuci polutan yang tidak diinginkan dari arus gas. Saat ini, istilah scrubber juga digunakan untuk menggambarkan sistem yang menyuntikkan atau memasukkan bahan aktif kering atau liquid kedalam arus gas kotor untuk mencuci gas. *Wet Scrubber* menurut Nock [24] adalah teknologi yang paling banyak digunakan untuk menghilangkan CO₂ dan H₂S dari biogas. *Wet scrubber* melibatkan penyerapan fisik CO₂ dan H₂S dalam air pada tekanan tinggi dengan perubahan suhu yang sangat sedikit. Terdapat CO₂ dalam biogas bereaksi dengan air membentuk asam karbonat.



Prinsip kerja *scrubber* terbagi atas dua bagian penting yaitu proses yang terjadi terhadap partikel serta proses yang terjadi terhadap gas. Pada kondisi ini *dry scrubber* tidak memiliki dampak terhadap proses pengendalian gas dikarenakan karakteristiknya difokuskan hanya untuk pengendali partikel padatan. Prinsip kerja *dry scrubber* adalah dengan mengendalikan aliran gas yang mengandung partikel padat atau langsung memfiltrasi aliran gas.

Scrubber adalah metode termudah dari gradasi biogas, dimana partikel air yang digunakan sebagai penyerap. Biogas mentah dapat dialirkan dari bawah dan diumpankan ke kolom *scrubber*, sedangkan air disemprotkan melalui nozel [10].

Menurut penelitian Boateng dan Kwofie [13] melakukan perancangan filter purifikasi dengan sistem wet scrubber. pada penelitiannya menyerap sekitar 92% CO₂ yang terdapat pada biogas mentah. Pada proses purifikasi biogas di kompresi pada tekanan 1,0 MPa dan 1,3 MPa. sehingga meningkatkan keluaran karbon dioksida dalam air.

Selain penelitian Boateng dan Kwofie, dalam pemurnian biogas Yong [14] juga menggunakan sistem *wet scrubber*. Cara kerjanya yaitu air dipompa menggunakan pompa kapasitas 1.100 liter per jam dan disemprotkan melalui *nozzle*. Biogas mentah masuk dari bak penampung menuju alat filter purifikasi tanpa melakukan kompresi. Pada penelitian yang dilakukan Shah dapat menaikkan konsentrasi gas methan dari 61,22% menjadi 89,54%. Terdapat banyak konfigurasi *scrubber* dan sistem *scrubber*, semuanya didesain untuk menyediakan kontak yang baik antara liquid dan gas kotor.

2.7.1 Keseimbangan Material Wet Scrubber

Skema *wet scrubber* yang digunakan menggunakan mekanisme *countercurrent* yang artinya laju alir gas dan zat cair dalam kolom saling berlawanan. Masukan gas berada pada bagian bawah kolom dan mengalir ke atas dan masukan zat cair berada pada bagian atas kolom dan mengalir ke bawah akibat pengaruh gravitasi.

Keseimbangan massa yang terjadi pada kolom *countercurrent* dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{y_b - y_t}{x_b - x_t} \quad (2.8)$$

Dimana:

L_s : laju alir zat cair (mol/jam)

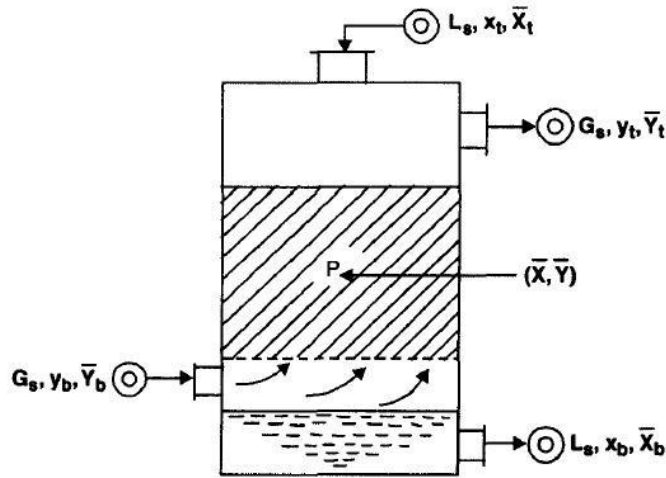
G_s : laju alir gas (mol/jam)

y_b : fraksi mol zat terlarut dalam gas pada bagian bawah kolom

y_t : fraksi mol zat terlarut dalam gas pada bagian atas kolom

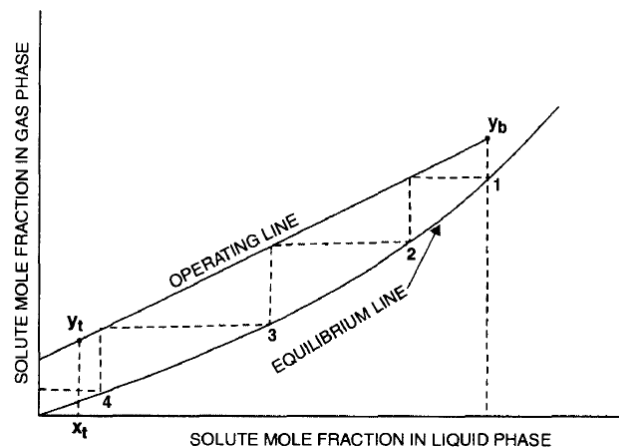
x_b : fraksi mol zat terlarut dalam zat cair di bagian bawah kolom

x_t : fraksi mol zat terlarut dalam zat cair pada bagian atas kolom



Gambar 2.2 Skema kolom *wet scrubber countercurrent* [29]

Nilai y_b selalu lebih besar dari y_t , sebab zat terlarut (kandungan yang ingin dihilangkan) pada gas di posisi bawah kolom belum terabsorpsi ke dalam zat cair dan nilai x_b selalu lebih besar daripada x_t sebab zat cair di bawah kolom telah mengabsorpsi zat terlarut dari gas. Proses absorpsi berdasarkan persamaan di atas dapat digambarkan dalam grafik berikut:



Gambar 2.3 Garis operasi dan ekuilibrium dari proses absorpsi [29]

Gambar 2.3 menunjukkan bahwa terdapat 2 garis yang mencerminkan proses absorpsi, yaitu garis operasi dan garis ekuilibrium atau *VLE-line* (*vapor-liquid equilibrium line*). *VLE line* berada di bawah garis operasi sebab selama proses absorpsi transfer zat terlarut terjadi dari fase gas ke fase zat cair. Hal ini

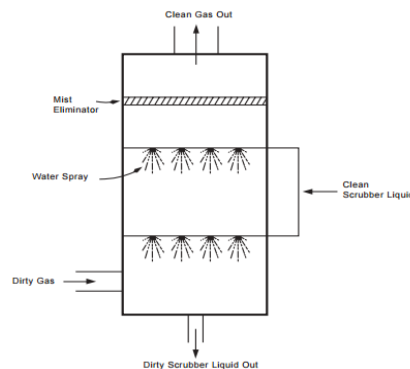
terjadi karena konsentrasi zat terlarut dalam gas lebih tinggi dibandingkan dalam zat cair ($Y_t > X_t$ dan $Y_b > X_b$). Garis operasi adalah garis yang didapat dari memplot titik (x_t, y_t) dan (x_b, y_b) ke dalam grafik, garis ini juga bisa didapat dari rasio L/G . Sedangkan *VLE-line* merupakan garis yang menunjukkan absorpsi gas yang sebenarnya ke dalam zat cair.

2.7.2 Jenis-Jenis *Wet Scrubber*

Operasi transfer massa antara gas dan zat cair dilakukan dengan menggunakan kolom/menara yang dirancang sedemikian sehingga diperoleh kontak yang baik antara kedua fase. Terdapat jenis-jenis *wet scrubber*, diantaranya yaitu:

a. *Spray Tower*

Tipe paling sederhana dari *wet scrubber* adalah *spray tower*, partikel yang ikut mengalir bersama aliran gas disemprot dengan air menggunakan *nozzle*. konstruksi tipe ini bisa ditempatkan secara horizontal atau vertikal. Berikut ini contoh dari *spray tower* dengan pemasangan secara vertikal.

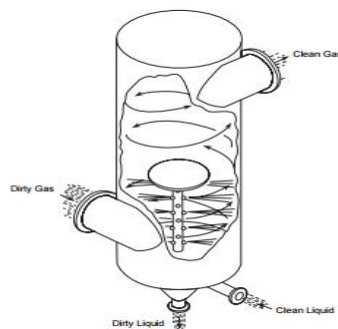


Gambar 2.4 *Spray tower* [27]

Mengandalkan semprot menara terutama pada koleksi partikel oleh impaksi, oleh karena itu, memiliki efisiensi tinggi untuk *Particular Matter* (PM) kasar. Efisiensi penghilangan menggunakan sebuah menara semprot dapat menghilangkan sebesar 90% untuk partikel yang lebih besar dari 5 μm . Untuk efisiensi penghilangan partikel dari 3-5 μm dengan diameter bekisar 60 – 80 %. Di bawah 3 μm , efisiensi *removal* menurun menjadi kurang dari 50%.

b. Cyclonic Spray

Perbedaan antara *cyclonic spray* dengan *spray tower* adalah dari segi konstruksi pada bagian aliran udara masuk ke *scrubber*. *Cyclonic spray* memiliki konstruksi bagian *inlet* gas yang dibuat pada posisi tangensial terhadap silinder *scrubber* sehingga gas yang masuk akan mengalami aliran turbulen sehingga alirannya akan bersinggungan dengan dinding silinder *scrubber*. Hal ini mengakibatkan gas yang mengalir bertambah kecepatannya. Sedangkan air yang disemprotkan berasal dari *nozzle* yang ditempatkan pada bagian tengah atas konstruksi *inlet* atau dari pipa yang ditempatkan ditengah sepanjang *scrubber*. Berikut beberapa tipe dari *cyclonic spray*.

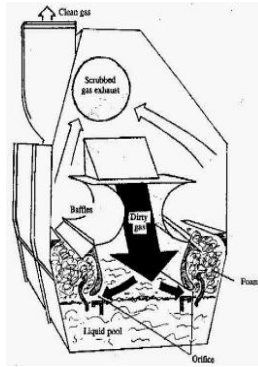


Gambar 2.5 *Cyclonic spray scrubber* [30]

Cyclonic spray scrubber memiliki efisiensi cukup besar dari menara semprot sederhana karena kecepatan relatif besar antara tetesan air dan gas di menara siklon. Efisiensi koleksi untuk jenis *scrubber* setinggi 95% untuk partikel yang lebih besar dari 5 μm , dan dari 60% - 70% untuk partikel submikron.

c. Orifice Scrubber

Pada *Orifice Scrubber* gas yang mengalir melewati genangan air, sehingga partikel akan mengendap sedangkan untuk partikel berukuran lebih kecil pada kondisi basah partikel akan melekat dan jatuh pada pelat penghantar dan mengalir kembali ke genangan air. Beberapa tipe dirancang dengan pelat penghantar yang dapat disetel kemiringannya agar kecepatan aliran partikel dapat dikendalikan. Untuk membuang endapan sistem ini menggunakan proses mekanik yang dibuat pada bagian bawah genangan air. Endapan tersebut dibuang dengan penghantar yang aplikasinya seperti *conveyor* ke bagian luar *scrubber*. Tipe ini mampu menampung aliran gas di atas 50.000 cfm.

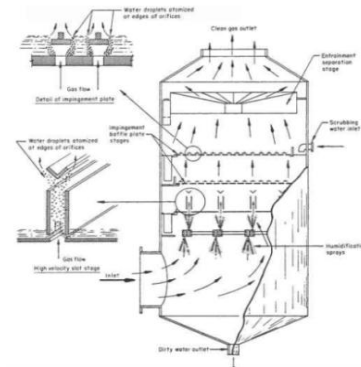


Gambar 2.6 Orifice scrubber [31]

Orifice scrubber tidak banyak digunakan tetapi telah diterapkan untuk pengering, kompor, menghancurkan, menggiling dan lain-lain. Jenis *scrubber* ini dapat secara efektif menghilangkan PM dengan diameter lebih dari 2 μm . Efisiensi kontrol berkisar 80 – 90%.

d. Impingement Plate Scrubbers

Prinsip kerja dari alat ini adalah gas inlet naik menuju ruangan *plate*. Proses pengumpulan bertumpu pada tetesan *droplet* yang berasal dari *baffle*. Kecepatan gas 60–75 m/s melalui lubang mengakibatkan ribuan jet yang menyemburkan suatu cairan ke dalam tetesan pada urutan 100 μ untuk membersihkan kontaminan gas.



Gambar 2.7 Impingement plate scrubbers [30]

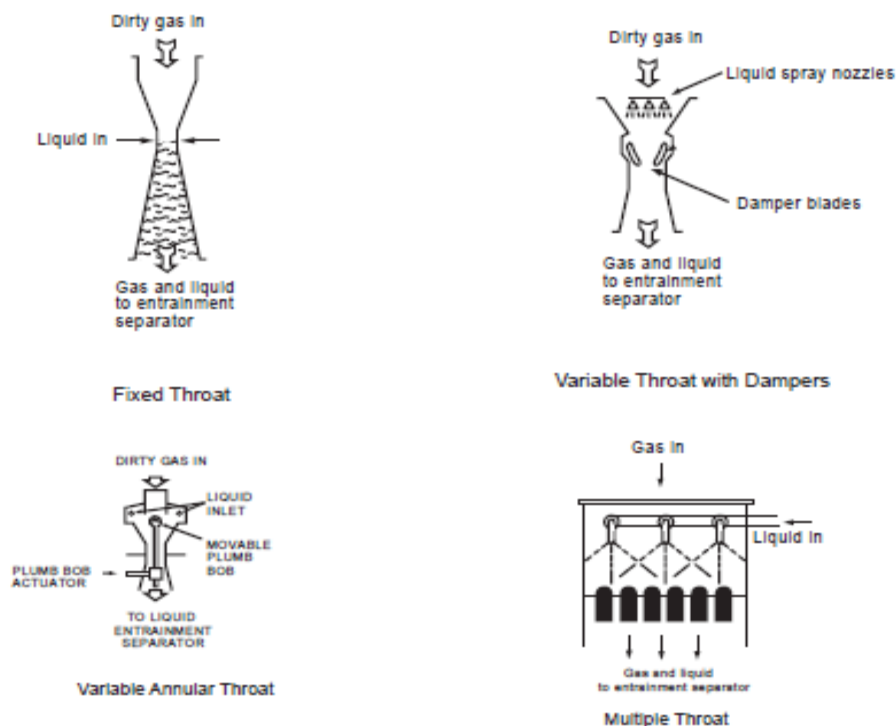
Outlet gas dapat didinginkan sampai kurang dari 5°F di atas suhu cairan yang masuk. Pelarut yang sering digunakan seperti alkohol, pentana, heksana, aseton, etilena glikol, klorofom, dan lain-lain. Pelarut dingin digunakan sebagai kontak langsung kondensasi cair dan menghilangkan panas.

Keuntungan:

1. Efisiensi untuk penyerapan uap dan gas tinggi;
2. Efisiensi sebesar 98% untuk partikel berukuran $5\ \mu$ atau lebih;
3. Efisiensi tinggi tercapai pada tekanan rendah;
4. Pengumpulan dan penyerapan gas, uap dan lain-lain dapat dilakukan secara bersamaan;
5. Dapat menangani suhu dan suhu fluktuasi yang tinggi.

e. Ventury Scrubber

Pada jenis sistem ini, luas penampang saluran mengecil kemudian membesar sepanjang saluran. Daerah yang memiliki diameter terkecil disebut *throat*, dengan adanya penurunan luas penampang saluran menyebabkan kecepatan gas buang dan turbulensi meningkat.



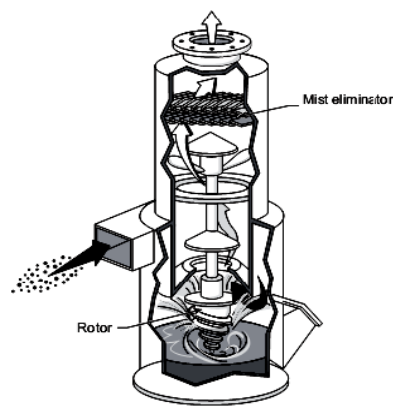
Gambar 2.8 *Venturi throat configurations* [32]

Cairan *scrubbing* disuntikkan ke dalam *scrubber* sedikit ke ujung *throat* atau langsung ke bagian *throat*. Cairan *scrubbing* dikabutkan oleh turbulensi di *throat*, meninggalkan kontak antara gas dan air, campuran gas dan air kemudian melambat saat bergerak melalui bagian divergen. Tetesan air kemudian

dipisahkan dari aliran gas di bagian *entrainment*, biasanya terdiri dari separator siklon dan eliminator kabut seperti diperlihatkan pada Gambar 2.8.

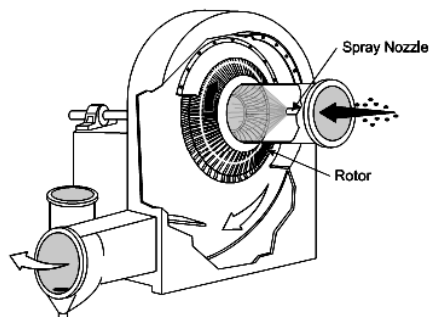
f. *Dynamic Scrubber*

Dynamic scrubber atau sering disebut dengan *Mechanically-Aided Scrubber* memiliki rotor pada konstruksinya yang fungsinya untuk mengarahkan aliran gas serta partikel hasil filtrasi. *Dynamic scrubber* menggunakan kombinasi gaya sentrifugal dan gravitasi untuk menghilangkan partikel kasar. Gas memasuki ruang bawah *scrubber* secara tangensial yang memberikan aksi siklon ke atas.



Gambar 2.9 *Mechanically induced spray scrubber* [33]

Algomerasi dimulai untuk menghilangkan partikel ukuran menengah melalui serangkaian baling-baling *scrubber*. Debu halus yang tersisa ditarik ke dalam ruang yang berdekatan dengan kipas yang dibasahi, sementara cairan penggosok yang dikelompokkan digunakan untuk mengurangi ukuran tetesan.



Gambar 2.10 *Centrifugal fan scrubber* [33]

Rotor yang ada pada *scrubber* digerakkan oleh motor listrik dengan penempatan rotor bisa ditempatkan diluar atau didalam konstruksi. Tipe ini lebih efisien digunakan untuk filtrasi partikel berukuran $< 1\mu\text{m}$ dan penggunaannya untuk aliran gas 1.000 – 5.000 cfm.

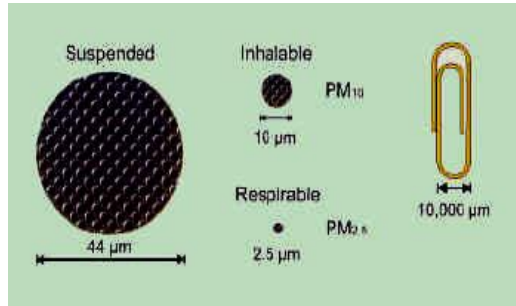
2.8 Particulate Matter (PM)

Berdasarkan desain dan karakteristiknya *wet scrubber* dirancang untuk memfiltrasi partikel, gas, ataupun partikel dan gas sekaligus. Performansi *wet scrubber* adalah berdasarkan kemampuannya dalam menangkap partikel ataupun mengabsorpsi gas. Proses filtrasi partikel pada *wet scrubber* adalah menangkap partikel yang terdapat pada gas dengan menggunakan butiran air sebagai fluida pengikatnya yang kemudian memisahkannya dari aliran gas. Untuk ukuran partikel itu sendiri disimbolkan dengan PM. Kategori partikel berdasarkan ukuran diameternya dikategorikan atas ukuran kecil dan ukuran besar dimana PM di bawah 2,5 dikategorikan sebagai partikel berukuran kecil, dan PM di atas 10 dikategorikan partikel berukuran besar. Ukuran partikulat merupakan karakteristik penting dari partikulat. Ukuran partikulat dinyatakan dalam diameter dengan satuan:

$$1\mu \text{ (mikron)} = 1\mu \text{ (mikrometer)}$$

$$1\mu = 10^{-6} \text{ m} = 10^{-3} \text{ mm}$$

Partikel yang ada dibagi menjadi dalam 3 kelompok berdasarkan diameter partikel yakni partikel halus berdiameter antara 0,0005 sampai 0,1 μ . Ukuran partikel menjadi besar terutama melalui proses penggumpalan (*agglomerasi*). Aglomerasi terjadi dalam fase gas disebabkan oleh gerak brown yang membuat partikel saling bersentuhan, dan membentuk partikel lebih besar. Proses ini berlangsung dalam lapisan awan atau kabut. Partikel sedang berukuran antara 0,1 sampai 1 μm . Partikel dalam *range* diameter ini sebagian terbentuk dengan adanya penggumpalan partikel halus. Sedangkan partikel besar berdiameter antara 1 sampai 100 μm . Partikel dalam kategori ini dapat dikumpulkan melalui pengendapan secara gravitasi.



Gambar 2.11 Ukuran partikel [34]

Beberapa istilah digunakan untuk menjelaskan partikulat berdasarkan EPA, yaitu:

1. *Dust* (debu)

Debu berukuran antara 1-10000 µm merupakan partikel padat berukuran kecil, berasal dari pecahan massa yang lebih besar. Debu tidak terdispersi karena mampu mengendap sendiri oleh adanya gaya gravitasi.

2. *Asap/gas*

Asap atau gas merupakan partikulat yang memiliki *range* diameter antara 0,5 sampai 1 µm. Asap atau gas berupa partikel padat, halus, merupakan hasil pembakaran tidak sempurna.

3. *Fume* (uap)

Diameter partikel uap antara 0,03 hingga 0,3 µm. Merupakan partikel padat dan halus. Terbentuk melalui kondensasi uap dari proses sublimasi dan destilasi. Uap ini mampu membentuk *flok* yang pada saat tertentu dapat mengendap.

4. *Mist* (kabut)

Mist memiliki diameter kurang dari 10µm. merupakan partikel cair berasal dari proses kondensasi uap. Umumnya tersuspensi dalam atmosfer.

5. *Spray*

Spray memiliki range diameter antara 10 sampai 1000 µm merupakan partikel cair yang terbentuk pada proses atomisasi cairan seperti pestisida atau herbisida.

2.9 Mekanisme Absorpsi *Wet Scrubber*

Proses absorpsi gas ke air disertai pula oleh transfer massa dari gas tersebut, dimana gas tersebut mengalami peralihan dari fase gas ke fase cair. Proses absorpsi gas tersebut dapat ditunjukkan melalui laju transfer massa dari fase gas ke fase cair sebagai berikut:

$$N = K_{G,p}.A.(p-p^*) \quad (2.9)$$

Dimana:

N : laju transfer massa (mol/s)

$K_{G,p}$: koefisien transfer massa fungsi tekanan (mol/s.m².Pa)

A : luas area transfer massa (m²)

$p-p^*$: *driving force* terhadap fase gas, fungsi tekanan (Pa)

Laju transfer massa di atas merupakan laju transfer massa ditinjau dalam fase gas, dimana laju transfer massa juga dapat ditinjau dalam fase cair yaitu:

$$N = K_{L,c}.A.(c^* - c) \quad (2.10)$$

Dimana:

N : laju transfer massa (mol/s)

$K_{L,c}$: koefisien transfer massa fungsi konsentrasi (m/s)

A : luas area transfer massa (m²)

c^*-c : *driving force* terhadap fase cair, fungsi konsentrasi (mol/m³)

Laju transfer massa ditinjau secara fase gas dan fase cair memiliki nilai yang sama, sehingga diperoleh hubungan:

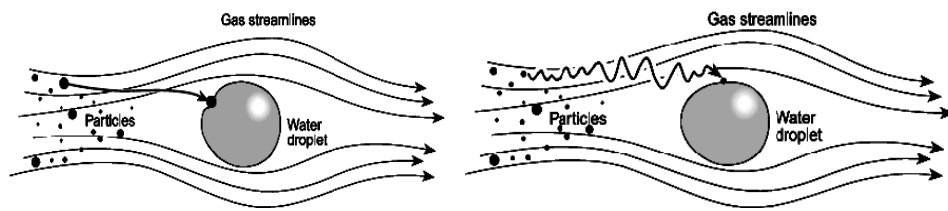
$$K_{G,p}.A.(p-p^*)=K_{L,c}.A.(c^*-c) \quad (2.11)$$

Berdasarkan persamaan di atas terlihat bahwa laju transfer massa bergantung pada nilai koefisien transfer massa ($K_{G,p}$ atau $K_{L,c}$), luas area transfer massa, dan *driving force*. Nilai koefisien transfer massa ini bergantung pada jenis wet scrubber, dimana pada penelitian yang digunakan adalah jenis kolom *tray* dan *packed*. Luas area transfer massa menyatakan besarnya permukaan kontak antara gas dan zat cair, sehingga semakin luas permukaan kontak maka laju transfer massa semakin cepat yang berarti bahwa proses absorpsi juga semakin besar. *Driving force* merupakan parameter absorpsi yang nilainya tergantung dari *pressure drop* yang terjadi, semakin rendah *pressure drop* yang terjadi maka *driving force* semakin tinggi.

2.10 Difusi dan Transfer Massa

2.10.1 Gerak Molekul dan Difusi

Fenomena difusi adalah hasil gerak molekul dalam fluida. Jika kita mengamati gerak molekul dalam fluida dari sudut pandang skala molekuler, maka molekul tersebut terlihat bergerak secara acak ke berbagai arah dan pada berbagai kecepatan. Proses koleksi pada *wet scrubber* terhadap partikel yang paling dominan adalah proses impaksi dan difusi. Pada proses impaksi partikel yang terdapat pada gas mengalir menurut aliran gas dan mengalami tubrukan dengan butiran air. untuk ukuran partikel $\geq 1\mu\text{m}$ sistem koleksi yang paling dominan adalah proses impaksi, sedangkan partikel berukuran sangat kecil $< 0,1\mu\text{m}$ bergerak secara acak pada aliran gas, dan saat partikel bersinggungan dengan butiran air terjadi proses pengikatan dimana partikel mengalami difusi dan masuk ke dalam butiran air. Di bawah ini merupakan proses impaksi dan difusi.



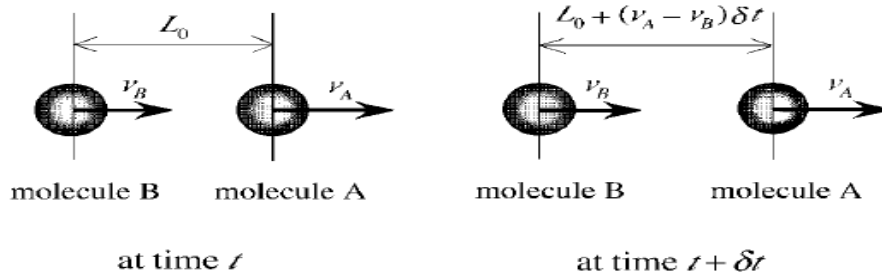
Gambar 2.12 proses impaksi dan difusi [35]

Pada *wet scrubber* butiran air yang di produksi dengan menggunakan metode pengkabutan pada umumnya berkisar antara 10 hingga 1000 μm [36]. Sedangkan ukuran partikel lebih spesifik bergantung dari proses sumber, misalnya untuk proses mekanik seperti pada pertambangan akan menghasilkan partikel berukuran lebih besar bila dibandingkan dengan proses kimia seperti pembakaran, rata-rata berukuran $\pm 10\mu\text{m}$, sedangkan pada proses pembakaran atau reaksi kimia akan dihasilkan juga partikel berukuran lebih kecil dari $5\mu\text{m}$ dan submicron partikel [37].

2.10.2 Diffusional Flux dan Kecepatan Referensi Difusi

Jika berasumsi bahwa gerak molekul adalah satu dimensi dan bahwa kecepatan molekul spesies- i , v_i [m/s], maka didapatkan persamaan berikut.

$$v_A = v_B = v_C = v \quad (2.12)$$

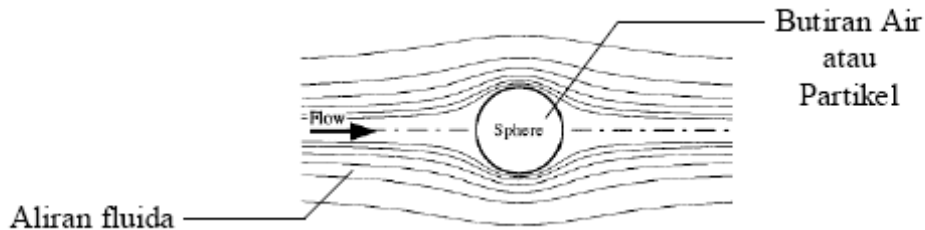


Gambar 2.13 Variasi jarak antara dua molekul yaitu kecepatan yang berbeda dengan waktu dalam sistem biner [35]

Karena jarak antara molekul tetap tidak berubah dalam kasus khusus ini, konsentrasi masing-masing spesies akan tetap tidak berubah. Dengan kata lain, fenomena difusi tidak diamati dalam kasus ini. Jika kecepatan molekul spesies- i , v_i berbeda maka jarak antara molekul akan berubah seiring waktu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Dalam kasus ini, konsentrasi masing-masing komponen akan berubah seiring waktu dan fenomena difusi.

2.10.3 Kecepatan Rata-Rata Butiran Air

Kecepatan rata-rata butiran air dan partikel dianalisis berdasarkan pada kondisi aliran fluida, serta kecepatan awal dari butiran air dan partikel tersebut. Fluida dalam analisis ini merupakan biogas yang mengalir di dalam kolom purifikasi. Gambaran dari proses ini dapat ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Butiran air atau partikel pada aliran fluida [35]

Reynold Number (Re) dari butiran kabut air dan butiran partikel gas dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Re_A = \frac{\rho_G \cdot d_p \cdot v_0}{\mu_G} \quad (2.13)$$

Dimana:

Re_A : Reynold Number butiran partikel

ρ_G : densitas biogas dalam kolom (kg/m^3) ; $\rho_G = 1,2 \text{ kg/m}^3$

d_A : diameter butiran partikel (m)

v_0 : kecepatan awal (m/s)

μ_G : viskositas biogas di dalam kolom (Pa.s) ; $\mu_G = 0,0001027$; poise
 $= 1,027 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Sehingga kecepatan rata-rata butiran adalah :

$$v_{\infty} = \left(\frac{4(\rho_A - \rho_G)d_A g}{3\rho_G C_A} \right)^{0.5} \quad (2.14)$$

Untuk menghitung kecepatan rata-rata campuran partikel dengan butiran air, digunakan perbandingan massa.

$$m_{\text{total}} = m_p + m_A$$

maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$m_{\text{total}} = \rho_G \cdot \frac{\pi}{6} D_G^3 + \rho_A \cdot \frac{\pi}{6} D_A^3 \quad (2.15)$$

Dimana:

ρ_G : Densitas biogas dalam kolom (kg/m^3) ; $\rho_G = 1,2 \text{ kg/m}^3$

D_G : Diameter butiran gas (m)

ρ_A : Densitas air dalam kolom (kg/m^3) ; $\rho_A = 1000 \text{ kg/m}^3$

D_A : Diameter butiran air (m)

Dari Tabel 2.6 dapat diketahui bahwa : $\sum_i x_i = 1$, perhitungan kecepatan rata-rata campuran partikel dan air berdasarkan pada perbandingan massa sebagai berikut jika kita mendefinisikan kecepatan rata-rata molar lokal dari campuran cairan dalam volume tertentu, v^* [m/s], maka menggunakan persamaan:

$$v^* = \sum_{i=1}^N x_i \cdot v_i \quad (2.16)$$

Tabel 2.6 Hubungan antara variasi konsentrasi pada sistem multikomponen [35]

	Fraksi Massa $\omega_A[-]$	Fraksi Mol $x_A[-]$	Densitas parsial $\rho_A[kgm^{-3}]$	Molar density $c_A[kmol \cdot m^{-3}]$	Tekanan Parsial $\rho_A[kPa]$
Fraksi Massa $\omega_A[-]$	ω	$\frac{x_A M_A}{\sum_i x_i M_i}$	$\frac{\rho_A}{\sum_i \rho_i}$	$\frac{c_A M_A}{\sum_i c_i M_i}$	$\frac{\rho_A M_A}{\sum_i \rho_i M_i}$
Fraksi Massa $\omega_A[-]$	$\frac{(\omega_A / M_A)}{\sum_i (\omega_i / M_i)}$	x_A	$\frac{\rho_A / M_A}{\sum_i (\rho_i / M_i)}$	$\frac{c_A}{\sum_i c_i}$	$\frac{\rho_A}{\sum_i \rho_i}$
Densitas Parsial $\rho_A[kgm^{-3}]$	$\rho \omega_A$	$\frac{\rho x_A M_A}{\sum_i x_i M_i}$	ρ_A	$c_A M_A$	$\frac{M_A \rho_A}{RT}$
Densitas Molar $c_A[kmol \cdot m^{-3}]$	$\frac{\rho \omega_A}{M_A}$	$c x_A$	$\frac{\rho_A}{M_A}$	c_A	$\frac{\rho_A}{RT}$
Tekanan Parsial $\rho_A[kPa]$	$\frac{(\omega_A / M_A) P}{\sum_i (\omega_i / M_i)}$	$p x_A$	$\frac{RT \rho_A}{M_A}$	$c_A RT$	ρ_A
$\sum_i x_i = 1, \sum_i \omega_i = 1, \rho = \sum_i \rho_i, c = \sum_i c_i, P = \sum_i p_i, M = \sum_i M_i x_i = (\sum_i \frac{\omega_i}{M_i})^{-1}$					

2.10.4 Transfer massa

Aliran material melalui antarmuka cairan-cairan atau padat-cairan dinamakan dengan aliran massa. Jika konsentrasi yang berada didekat antarmuka tidak sejenis, aliran massa terjadi karena efek difusi. Oleh karenanya, aliran massa sangat berhubungan erat dengan difusi. Pada bagian ini, akan didiskusikan hubungan antara *flux* massa dan *flux* difusional. Laju aliran massa dari komponen-*i* biasanya disebut sebagai massa dari komponen-*i* melewati satuan luas dari antarmuka per satuan waktu, yang mana mengacu sebagai flux massa dari komponen-*i*, N_i [kg/m²s]. Karena itu, persamaan umum untuk flux massa sebagai berikut [35]:

$$N_i = \rho_s \omega_{is} v_{is} \quad (2.17)$$

Dapat dibuat persamaan menjadi:

$$N_A = \frac{sh.(1-\omega).\rho_g.D}{d_A} . (\frac{\omega}{1-\omega}) \quad (2.18)$$

Dimana:

N_A : Number of Transfer Unit ($\frac{kg}{m^2} . s^{-1}$)

Sh : Sherwood Number butiran air

ω : specific humidity (kg H₂O / kg udara kering)

D : difusifitas butiran air dengan biogas (m²/s)

d_A : diameter butiran air (m)

ρ_G : Densitas biogas dalam kolom (kg/m³) ; $\rho_G = 1,2 \text{ kg/m}^3$

2.10.5 Performa Scrubber

Performa filtrasi partikel merupakan efisiensi *wet scrubber* yang dihimpun dari efisiensi filtrasi impaksi, intersepsi, dan difusi, dengan ketentuan untuk densitas partikel $\neq 1 \text{ gr/cm}^3$, maka total keseluruhan efisiensi dikalikan dengan

$(\frac{\rho_A}{\rho_P})^{1/2}$ [38]. Adapun perhitungannya dapat menggunakan persamaan di bawah

ini:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{total}} = & \frac{8}{R_e S_c} \left\{ 1 + \frac{0,4}{\sqrt{2}} . R_e^{1/2} . S_c^{1/3} + \frac{0,16}{\sqrt{2}} . R_e^{1/2} . S_c^{1/2} \right\} + 4k \{ \omega^{-1} + (1 + \sqrt{2} R_e^{1/2}) k \} \\ & + \left\{ \frac{2S_t - S_*}{2S_t - S_* + \frac{2}{3}} \right\}^{3/2} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Dimana:

$$S^* = \frac{1,2 + \frac{1}{2} \ln(1 + \frac{R_e}{2})}{1 + \ln(1 + \frac{R_e}{2})}$$

Stoke Number partikel berdasarkan : $S_t = \frac{C_c \cdot \rho_p \cdot d_p^2 \cdot v_{tA}}{18 \cdot \mu_G \cdot d_A}$

Reynold Number partikel berdasarkan : $Re = \frac{\rho_G \cdot d_A \cdot v_{tA}}{\mu_G}$

Schmidt Number partikel berdasarkan : $S_c = \frac{\mu_G}{\rho_G \cdot D}$

Rasio densitas : $k = \frac{d_p}{d_A}$

Rasio viskositas : $\omega = \frac{\mu_A}{\mu_G}$

Keterangan :

C_c : *Cunningham Slip Correction Factor*

d_p : diameter partikel (m)

d_A : diameter butiran air (m)

v_{TA} : kecepatan relatif butiran air (m/s)

μ_G : viskositas biogas (kg/m.s)

ρ_p : densitas partikel (kg/m³)

ρ_G : densitas biogas (kg/m³)

D : koefisien difusifitas (m²/s)

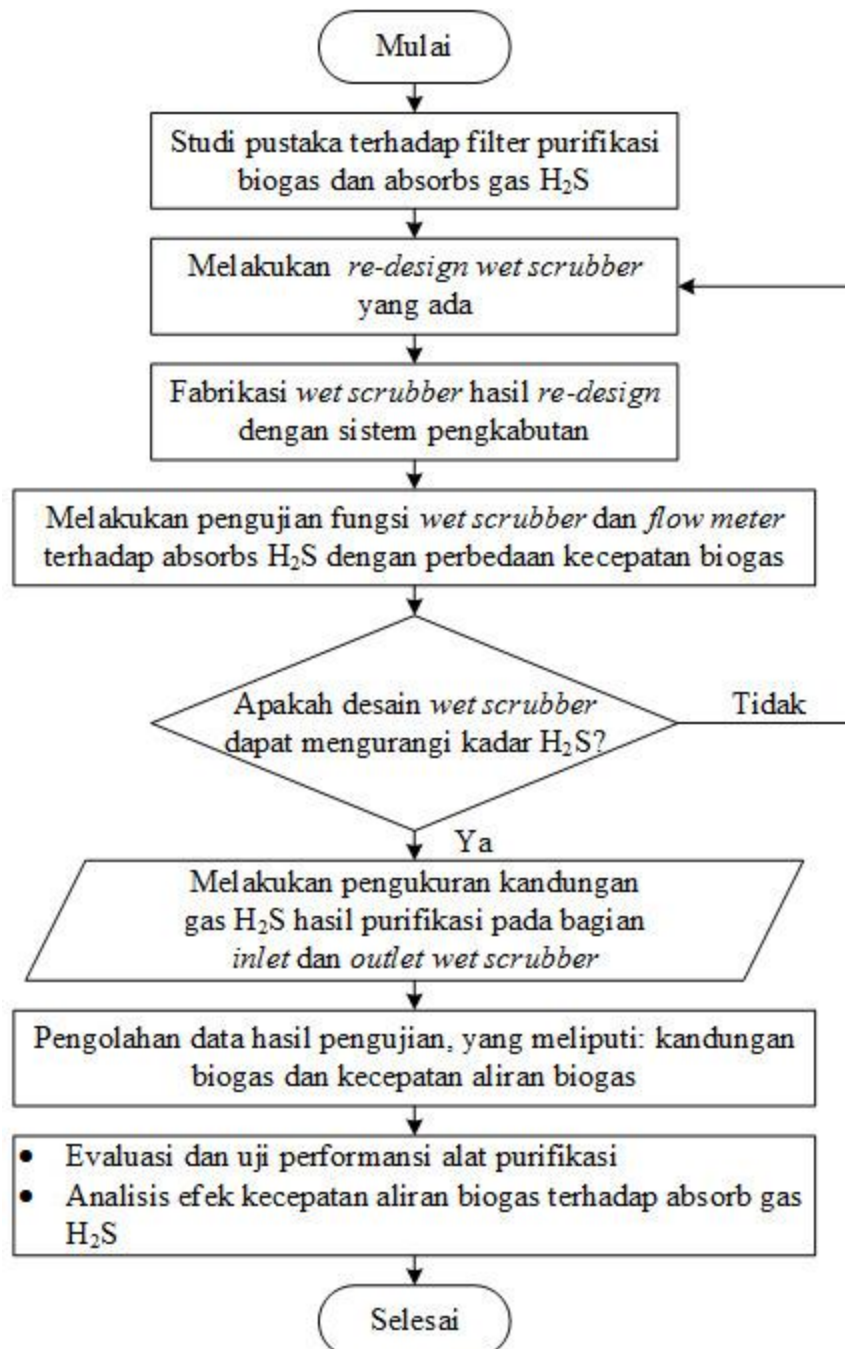
T : temperatur partikel dalam kolom biogas (K)

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Untuk membuat alat purifikasi biogas dengan hasil yang diinginkan, maka diagram alir penelitian dibuat sebagaimana di sajikan pada Gambar 3.1 berikut :



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Objek dari penelitian ini adalah instalasi pemurnian H_2S dari hasil proses biogas secara anaerobik. Sehingga aliran biogas yang keluar dari alat purifikasi adalah hasil *treatment* yang telah memiliki kadar H_2S rendah. Bahan baku Biogas yang digunakan merupakan kotoran sapi di ICCRI Jember. Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk mengetahui kemampuan beberapa bahan dalam mereduksi kandungan H_2S , seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4. Berdasarkan hasil studi literatur tersebut, kemudian dirancang sistem pemurnian biogas dengan menggunakan *wet scrubber* pengkabutan. Hasil perancangan diuji dan dianalisis untuk mengetahui performanya dalam mereduksi kandungan H_2S dalam biogas.

Tahap perancangan sistem purifikasi biogas didasarkan pada hasil kaji literatur, kaji karakteristik, desain dan kandungan gas dari produk digester anaerob yang sudah ada. Pengambilan produk biogas dilakukan di ICCRI Jember atau Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Jember.



Gambar 3.2 pemasangan alat purifikasi biogas sebelum *redesign*

Dari rancangan awal ini diperoleh konsep pemurnian pada biogas. Perancangan awal dimaksudkan untuk mendapatkan desain yang diterapkan pada sistem pemurnian biogas tersebut dengan memperhatikan data-data yang diperoleh dari studi literatur sebelumnya.

Setelah dilakukan studi literatur dan obsevasi lapangan, maka sistem pemurnian pada biogas menggunakan beberapa komponen instrumentasi mulai dirancang. Rancangan sistem ini menggunakan *wet scrubber* untuk mengabsorbsi unsur-unsur gas yang tidak diinginkan, seperti H_2S .

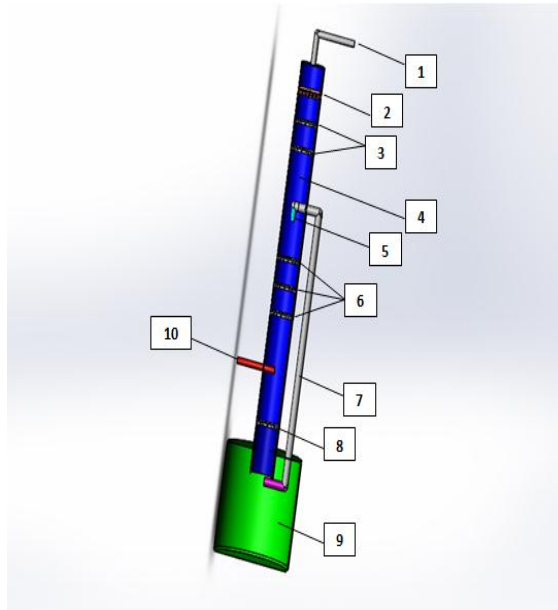
Sebelumnya alat purifikasi telah dirancang untuk mengurangi kadar H_2S dan CO_2 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. Alat purifikasi ini mempunyai kelebihan, yaitu kolom adsorber dan kolom absorber yang menjadi satu. Namun, alat purifikasi ini juga mempunyai beberapa kekurangan dalam pengoperasiannya, yaitu kolom adsorber dirancang permanen sehingga proses purifikasi harus dihentikan terlebih dahulu ketika bahan adsorben jenuh dan perlu diganti. Alat purifikasi ini memanfaatkan pompa untuk meningkatkan tekanan air untuk disemprotkan ke dalam kolom absorber. Dari beberapa kekurangan tersebut, perbaikan dilakukan pada alat purifikasi dengan menggunakan kolom adsorber yang dapat diganti tanpa perlu menghentikan proses. Dua jalur gas dibuat agar aliran dapat dialihkan kedalam adsorben baru apabila adsorben lama mulai jenuh. Selain itu desain baru mampu menghemat penggunaan listrik, yang awalnya menggunakan pompa dengan kebutuhan listrik sebesar 60 watt menjadi sebesar 7,08 watt untuk keperluan *wet scrubber* dan *blower*.

Beberapa parameter yang dianalisis dalam uji karakteristik sistem absorpsi pada penelitian ini yaitu peningkatan reduksi gas H_2S . Pada tahap ini dilakukan analisis mekanika fluida dan analisis fenomena absorpsi yang terjadi di dalam sistem purifikasi. Setelah hasil analisis didapatkan, penulisan laporan berdasarkan hasil penelitian dilakukan untuk kemudian disimpulkan.

Spesifikasi pompa listrik yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Merk "HAI LONG" type H-105
- AC 220 – 240 V
- Daya listrik : 60 W
- H max : 3 m
- Kapasitas max : 3000 L / jam

Spesifikasi alat dari penelitian sebelumnya di tunjukkan pada Gambar 3.3 berikut



Keterangan :

1. Pipa output biogas
2. *Chevron blade*
3. Tray trap berisi CaO dan CaCl_2
4. Kolom utama purifikasi
5. *Nozzle*
6. *Tray trap*
7. Pipa aliran air untuk *water scrubber*
8. *Tray trap*
9. Tangki berisi air dan pompa
10. Pipa input biogas

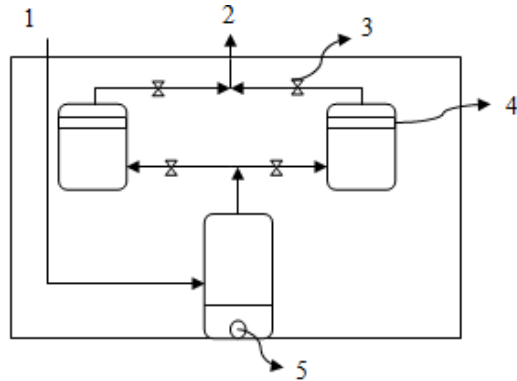
Gambar 3.3 Spesifikasi alat purifikasi sebelum *redesign*

3.2 Perlengkapan Alat Uji

Dalam melakukan pengujian pada penelitian ini ada beberapa peralatan pengujian yang digunakan, antara lain :

1. *Sample Bag* sebagai tangki penampung input dan output biogas.
2. *Gaztox Oxygen and Toxic Gas Detector* tipe PID digunakan untuk mengukur konsentrasi kadar oksigen (O_2), atau gas beracun seperti hidrogen sulfida (H_2S), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO_2).
3. *Gas Chromatography* (GC) yang berfungsi untuk mengukur kadar CO_2 dan CH_4 yang terkandung di dalam biogas.
4. sampel plastik dan *timer* digunakan untuk pengukuran debit aliran biogas yang masuk ke dalam alat purifikasi secara manual.

3.3 Design *Wet Scrubber* dengan sistem pengkabutan



Gambar 3.4 Skema pengujian purifikasi biogas

Keterangan:

- 1. inlet
- 2. outlet
- 3. katub
- 4. CaO
- 5. *Nozzle*

Tinggi kolom *wet scrubber* : 27 cm

Diameter : 15,9 cm

Terdapat 2 bagian adsorber pada instalasi kolom purifikasi biogas yaitu pada sisi kanan dan kiri, sementara di bagian bawah terdapat *wet scrubber*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Sehingga gas yang akan difilter masuk melalui kolom *wet scrubber* terlebih dahulu untuk selanjutnya melewati salah satu kolom adsorber. Kolom adsorber memiliki dua bagian dimana satu kolom berfungsi sebagai pengganti kolom lainnya ketika mengalami kejenuhan tanpa perlu menghentikan proses. Mekanisme ini berlangsung secara otomatis.



Gambar 3.5 kolom adsorber gas CO₂

Sebelum biogas masuk menuju kolom adsorber, biogas terlebih dahulu masuk kedalam kolom *wet scrubber*. Kolom *wet scrubber* dirancang dengan menggunakan air yang dikabutkan, sehingga partikel air yang terbentuk berukuran sangat kecil. Hal ini menyebabkan kontak antara air dan biogas menjadi lebih optimal. Air yang dikeluarkan dengan metode pengkabutan berfungsi untuk menangkap gas H_2S yang masuk ke dalam kolom *wet scrubber* bersama biogas. Gambar 3.6 menunjukkan kondisi ketika air disemprotkan.



Gambar 3.6 kolom *wet scrubber*

Cara kerja *wet scrubber* adalah dengan menghisap air ke dalam mesin. Air yang telah masuk ke dalam mesin akan disemprotkan kembali melalui nozzle (Gambar 3.7) dalam ukuran partikel yang lebih kecil (kabut). Kabut yang bersirkulasi di dalam kolom selanjutnya akan bercampur dengan biogas. *Wet scrubber* ini memiliki kebutuhan daya sebesar 6 watt.



Gambar 3.7 Nozzle

Kolom *wet scrubber* terdiri dari beberapa komponen, salah satunya adalah *blower* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8. *Blower* berfungsi untuk

mengoptimalkan proses pengkabutan yang dihasilkan oleh *wet scrubber* agar merata. *Blower* yang digunakan adalah merk Hanaya dengan arus 0,09 ampere dan voltage 12 V, sehingga kebutuhan daya yang diperlukan blower adalah 1,08 watt.

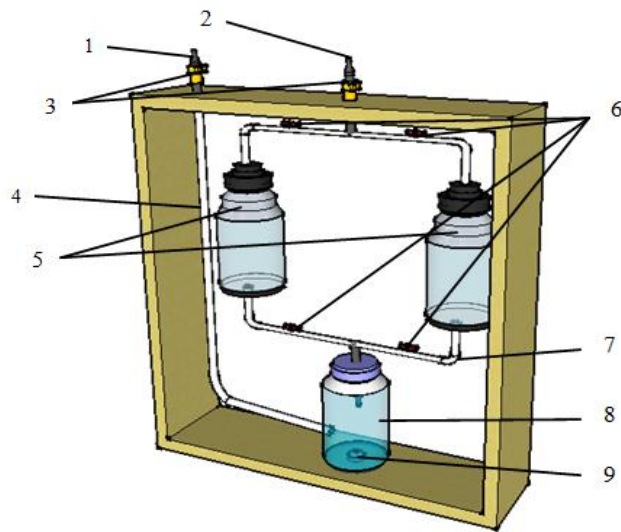


Gambar 3.8 *Blower*

Adapun instalasi alat purifikasi biogas pada Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Jember ditunjukkan pada Gambar 3.9. dan Gambar 3.10. Biogas langsung dialirkan pada alat purifikasi melalui lubang inlet, kemudian biogas mengalir kedalam kolom absorber untuk dikurangi unsur H_2S . Selanjutnya, biogas melalui kolom adsorber untuk menghilangkan unsur CO_2 dan keluar melalui *outlet*.



Gambar 3.9 Pemasangan uji alat purifikasi biogas



Keterangan :

1. Inlet biogas
2. Outlet biogas
3. Flow meter
4. Selang menuju kolom
wet scrubber
5. Kolom adsorber
6. Valve
7. Pipa menuju adsorber
8. Kolom *wet scrubber*
9. Nozzle

Gambar 3.10 Perancangan alat purifikasi

3.4 Metode Pengumpulan dan Analisis Data

Parameter yang dianalisa dalam penelitian ini adalah kandungan H_2S dalam biogas. Data kandungan H_2S dalam biogas diukur dengan menggunakan *Gas Chromatography*. Pengambilan data dilakukan terhadap produk biogas sebelum dan sesudah dilakukan *treatment*. Pengambilan data kadar H_2S dilakukan dengan mengubah kecepatan biogas dengan variasi bukaan *valve* sebesar 100%, 75%, 50% dan 25%. Sementara kecepatan aliran air dijaga agar tetap konstan sebesar $5,24 \times 10^{-4}$ m/s.

Kecepatan biogas ditentukan dengan mengukur debit biogas yang masuk pada alat purifikasi, dimana cara pengambilan data debit air dengan menggunakan Hukum Archimedes. *Sample bag* dibenamkan ke dalam bejana berisi air selama 1 menit. Ketika *sample bag* mulai terisi biogas, maka terdapat sebagian air yang tumpah dari bejana. Volume air yang tumpah dari bejana selama 1 menit kemudian diukur. Berdasarkan Hukum Archimede, volume air yang dipindahkan sama dengan volume *sample bag* yang dicelupkan. Sehingga dari metode tersebut, debit biogas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{biogas} = \frac{V_{air}}{t} \quad (3.1)$$

Dimana :

Q_{biogas} : debit biogas yang masuk ke dalam *sample bag*

V_{air} : volume air yang tumpah

t : waktu pengambilan data (1 menit)

Analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis deskriptif, yaitu analisis yang memberikan Gambaran terhadap fenomena yang terjadi dalam proses penurunan kadar H_2S . Analisis dilakukan dengan pendekatan mekanika fluida, termodinamika dan proses adsorpsi yang terjadi di dalam kolom purifikasi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab 4 hasil dan pembahasan menjelaskan tentang hasil eksperimental dan analisis purifikasi biogas menggunakan metode pengkabutan. Tahapan awal yang dilakukan adalah penyelesaian pembuatan alat dan dilanjutkan dengan pengukuran dan pengamatan kinerja alat purifikasi. Pengambilan data eksperimen menggunakan biogas yang diproduksi oleh pusat penelitian kopi dan kakao, Kabupaten Jember. Data yang diperoleh yaitu kadar H_2S yang dilakukan variasi bukaan *katup*, sehingga diperoleh komposisi campuran antara *velocity* biogas dan air yang dikabutkan. Proses pengukuran H_2S pada penelitian ini dilakukan secara langsung di tempat produksi biogas dengan menggunakan Gas Chromotography (GC). Sampel yang diambil terbagi menjadi dua pada setiap bukaan, yaitu sampel untuk biogas sebelum melewati alat purifikasi dan sampel biogas sesudah melewati alat purifikasi. Hasil pengukuran kadar H_2S ditunjukkan pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Data hasil pengukuran H_2S menggunakan GC

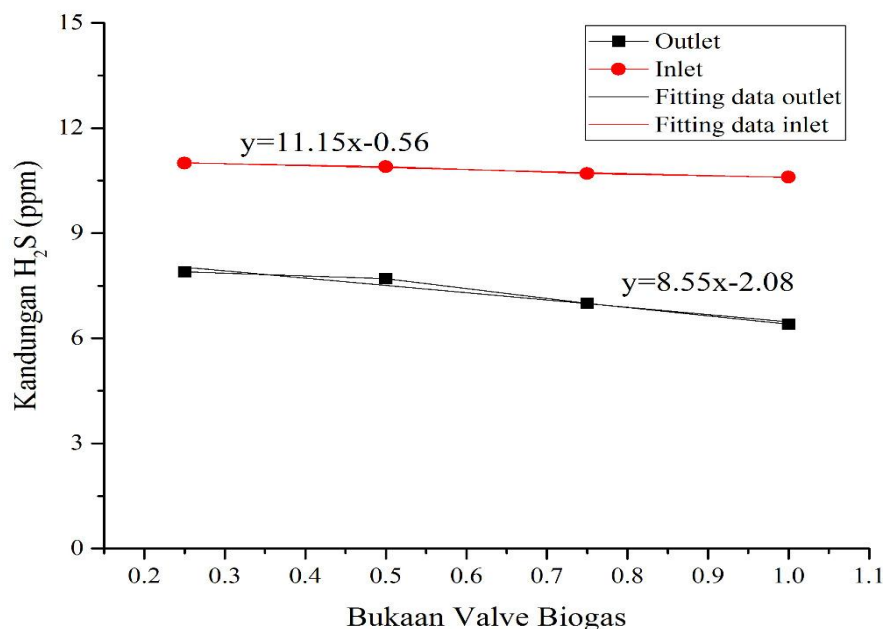
No	Katup (%)	Velocity (m/s)	Kadar H_2S Sebelum (ppm)	Kadar H_2S Sesudah (ppm)
1	25	11,13	11,0	7,9
2	50	2,78	10,9	7,7
3	75	1,25	10,7	7,0
4	100	0,69	10,6	6,4

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.1 menunjukkan bahwa diperoleh penurunan kadar H_2S mengalami penurunan yang berbanding terbalik dengan luas bukaan katup gas. Namun penurunan kadar H_2S yang paling banyak, ketika *velocity* biogas yang masuk pada alat purifikasi sebesar 0,69 m/s yang ditunjukkan oleh variasi katup gas 100%. Penurunan kadar H_2S disebabkan oleh adanya kontak antara kabut air dan biogas, yang dapat ditunjukkan reaksi kimia seperti pada persamaan (2.4).

Hal ini menunjukkan bahwa kabut air yang memiliki kecepatan rata-rata konstan sebesar $5,24 \times 10^{-4}$ m/s lebih baik bila direaksikan menggunakan kecepatan aliran gas sebesar 0,69 m/s. Pergerakan air dan biogas pada sistem purifikasi cenderung lambat, sehingga penyerapan H_2S pada biogas lebih optimal. Meskipun demikian, diperlukan analisis lebih lanjut terkait dengan proses regenerasi pada air, karena saat air bereaksi dengan biogas, maka air mengalami perubahan menjadi asam sulfat (H_2SO_4).

4.1 Data Pengukuran H_2S dan Analisis Hasil Pengukuran

Mekanisme pengukuran awala yang dilakukan adalah pengukuran kadar biogas sebelum masuk ke kolom alat purifikasi. Selama pengukuran biogas tersebut, secara simultan juga diukur input dan output dari kolom untuk mengetahui kadar biogas. Proses pengukuran dilakukan dengan variasi pembukaan katup gas yaitu 25%, 50%, 75%, 100%. Data diambil ketika gas dalam keadaan sebelum (*inlet*) dan sesudah (*outlet*) melewati sistem purifikasi. Hasil pengukuran kadar H_2S pada inlet dan outlet ditunjukkan pada Gambar 4.1.

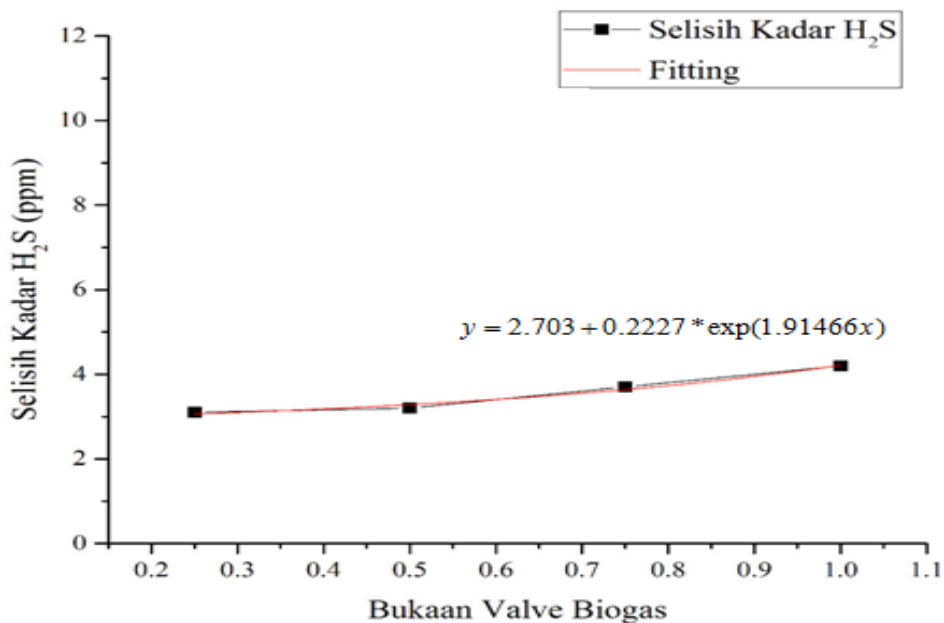


Gambar 4.1 Grafik hasil pengukuran kadar H_2S

Dari hasil pengukuran ini menunjukkan bahwa alat purifikasi biogas yang dibuat mampu mereduksi H_2S dengan variasi bukaan katup gas. Pengujian ini dilakukan dengan variasi bukaan katup gas namun keluaran air yang digunakan sebagai absorber dilakukan konstan sebesar $5,24 \times 10^{-4}$ m/s. Bukaan katup gas 25% memiliki kecepatan sebesar 11,13 m/s dapat mereduksi kadar H_2S yang awalnya memiliki kadar 11,0 ppm menjadi 7,9 ppm. Bukaan katup 50% dengan kecepatan biogas sebesar 2,78 m/s dapat menurunkan kadar H_2S yang awalnya sebesar 10,9 ppm menjadi 7,7 ppm. Dengan kecepatan biogas sebesar 1,25 m/s menggunakan bukaan katup 75% dapat mengurangi kadar H_2S dari biogas yang berkadar 10,7 ppm menjadi 7,0 ppm. Bukaan penuh yaitu katup gas 100% memiliki kecepatan biogas sebesar 0,69 m/s dan dapat menurunkan kadar H_2S dari 10,6 ppm menjadi 6,4 ppm. Dari hasil pengamatan dapat disimpulkan bahwa semakin kecil kecepatan biogas yang masuk ke dalam kolom absorpsi atau melewati alat purifikasi maka semakin kecil konsentrasi gas H_2S yang terukur.

4.1.1 Kinerja Kolom *Wet Scrubber* Hasil Perancangan Ulang

Perancangan ulang dilakukan pada kolom adsorber dan absorber. Kolom absorber dirancang menggunakan metode pengkabutan dengan memiliki diameter 15,9 cm dan tinggi kolom *wet scrubber* sebesar 27 cm.



Gambar 4.2 Grafik besarnya H_2S yang tereduksi sesuai dengan bukaan *valve*

Pada kolom *wet scrubber* telah dirancang lengkap dengan *blower* yang bertujuan untuk menyebarkan kabut air. Tujuan utama kolom *wet scrubber* yaitu menghasilkan pengurangan kadar H_2S yang optimal dengan cara menyesuaikan atau memvariasikan jumlah gas yang masuk dengan air yang masuk konstan.

Pararameter kinerja ini menunjukkan efisiensi penyerapan biogas dengan kemampuan air untuk menyerap biogas. Semakin banyak biogas yang diserap oleh air maka efisiensi penyerapan semakin tinggi. Presentase efisiensi menunjukkan perbandingan antara jumlah mol gas terlarut dengan jumlah mol air. Efisiensi ditunjukkan pada setiap bukaan katub gas. Grafik yang menunjukkan efisiensi penyerapan H_2S terhadap biogas pada air ditunjukkan pada Gambar 4.2.

Gambar 4.2 menunjukkan kadar H_2S yang dapat direduksi sebagai fungsi dari bukaan valve. Dari Gambar tersebut dapat terlihat bahwa semakin besar bukaan valve biogas maka semakin banyak kadar H_2S yang dapat tereduksi. Penurunan kadar H_2S membentuk fungsi eksponensial dengan persamaan sebagai berikut:

$$y = 2.703 + 0.2227 * \exp(1.91466x) \quad (4.2)$$

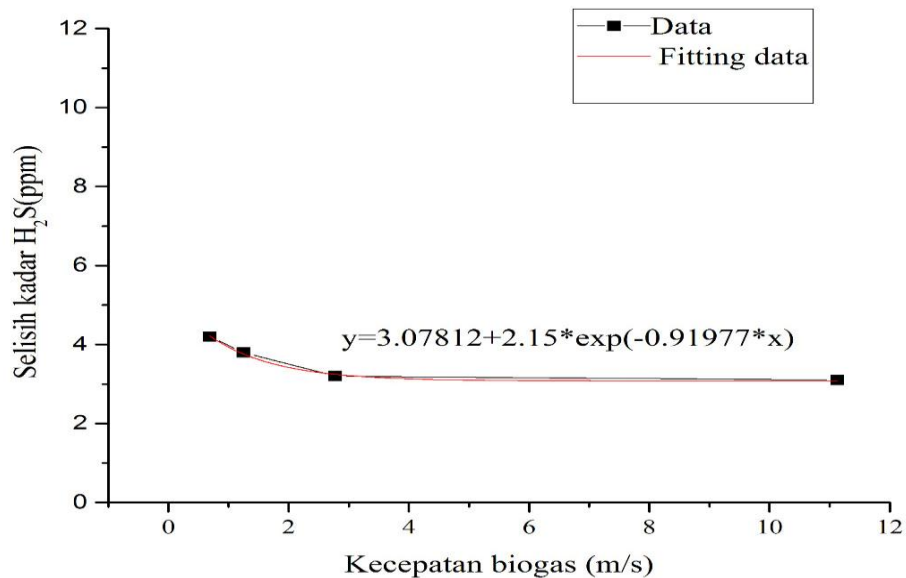
Hal ini sesuai dengan pernyataan Chen [33] yang menyatakan bahwa kecepatan biogas yang semakin kecil dapat meningkatkan gesekan yang terjadi antara biogas dengan air terhadap hidrogen sulfida yang terkandung dalam biogas. Penurunan kadar H_2S dengan variasi bukaan katub menunjukkan bahwa absorber dalam air yang dikabutkan mampu menyerap gas H_2S pada biogas. Penyerapan maksimal gas H_2S ini terdapat pada bukaan penuh dengan kecepatan biogas yang paling rendah yaitu 0,69 m/s.

Untuk mengetahui pengaruh kecepatan terhadap selisih pengurangan kadar H_2S telah ditampilkan pada Gambar 4,3 yang menjelaskan bahwa semakin rendah kecepatan gas yang masuk kolom *wet scrubber* maka semakin besar pengurangan kadar H_2S -nya yaitu mencapai 4,2 ppm. Penurunan kadar H_2S ini mengikuti persamaan eksponensial, sebagai berikut:

$$y = 3.07812 + 2.15 * \exp(-0.9197x) \quad (4.3)$$

4.1.2 Analisa Kinerja *Wet Scrubber* dengan Kecepatan Alir Biogas yang Bervariasi

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari perubahan kecepatan alir biogas terhadap proses absorpsi pada kolom *wet scrubber*, dimana proses absorpsi akan berpengaruh pada kadar H_2S yang keluar dari kolom *wet scrubber*. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan penurunan kadar H_2S optimal, sehingga dilakukan penyesuaian jumlah biogas yang masuk berdasarkan air yang konstan. *Wet scrubber* yang digunakan adalah jenis pompa air mini yang di salurkan dengan nozzle yang dapat menyembrotkan air menjadi partikel-partikel kecil atau kabut. Grafik yang menunjukkan kadar H_2S terhadap pengaruh kecepatan biogas yang di variasikan telah ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik hubungan kecepatan gas terhadap selisih kadar H_2S

Kecepatan dengan bukaan katup gas berbanding terbalik dengan kecepatan gas. Apabila bukaan katup semakin kecil maka kecepatan yang diperoleh semakin besar. Hubungan kecepatan terhadap selisih kadar H_2S yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. menjelaskan bahwa semakin rendah kecepatan gas yang masuk kolom *wet scrubber* maka semakin besar pengurangan kadar H_2S -nya yaitu mencapai 4,2 ppm. Pengurangan tersebut dikarenakan hidrogen sulfida mudah larut dalam air. Tingkat penyerapan H_2S akan lebih baik dengan tingkat air yang tinggi dan kecepatan biogas yang kecil, namun penurunan kadar H_2S dapat

menyebabkan kejenuhan pada air yang digunakan sebagai absorber. Hal tersebut dapat dicegah dengan mengganti air yang terkontaminasi H_2S , sehingga bisa terus menyerap hidrogen sulfida dengan baik. Selisih antara kadar H_2S pada *outlet* dan *inlet* yang lebih banyak disebabkan oleh biogas yang masuk pada instalasi filter memiliki kecepatan yang lebih rendah, sehingga kontak antara kabut air dan gas yang berada dalam sistem purifikasi lebih lama.

Pengaruh variasi kecepatan biogas dititikberatkan pada proses penyerapan gas H_2S yang melewati alat purifikasi. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh bukaan katup gas yang divariasikan dengan air yang disemprotkan berupa kabut terhadap penyerapan H_2S yang terproduksi bersama unsur utamanya yaitu metana.

4.2 Analisis Wet Scrubber

Air dalam instalasi purifikasi ini digunakan untuk *wet scrubber* didistribusikan oleh alat pengkabutan pada sebuah kolom. Kolom tersebut memiliki diameter 0,78 m, dan volume air sebesar $0,002 \text{ m}^3$. Nilai debit ($\dot{V} = 1,5 \text{ ml/menit}$) dan densitas air sebesar 1000 kg/m^3 diperoleh kecepatan aliran air sebesar $5,24 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, perhitungan dilampirkan pada Lampiran A. Kecepatan air yang masuk kolom *wet scrubber* pada analisis ini dibuat konstan.

Data kecepatan yang diperoleh dari perhitungan dapat digunakan untuk menganalisis butiran air kabut. Butiran air kabut dan partikel gas dapat diperoleh berdasarkan kondisi awal pendistribusian serta kondisi yang dialami pada bagian pencampuran (*mixing chamber*). Analisis yang akan dilakukan pada alat purifikasi ini mengasumsikan besar butiran partikel sebesar $1 \text{ }\mu\text{m}$ untuk partikel gas dan $10 \text{ }\mu\text{m}$ untuk air kabut. Kecepatan rata-rata butiran air kabut dan kecepatan rata-rata butiran partikel gas berdasarkan kondisi aliran fluida dapat dihitung dengan mengetahui *Reynold number* dari masing-masing fluida pada persamaan (2.13). *Reynold number* untuk butiran air kabut dan butiran gas berturut-turut sebesar $6,12 \times 10^{-5}$ dan $8,12 \times 10^{-3}$. Perhitungan kecepatan rata-rata butiran air kabut dan butiran partikel gas dapat dihitung menggunakan persamaan (2.14). Kecepatan rata-rata pada masing-masing fluida di dalam kolom purifikasi sebesar $5,27 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ untuk kecepatan rata-rata butiran air kabut dan $1,82 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ untuk

kecepatan rata-rata butiran partikel gas. Perhitungan ini dilampirkan pada Lampiran B.

Kecepatan rata-rata campuran antara partikel dan butiran air dapat dihitung menggunakan perbandingan massa. Massa total untuk partikel air kabut berukuran 10 μm dan butiran partikel gas berukuran 1 μm adalah $5,23 \times 10^{-13}$ kg. Nilai tersebut merupakan penjumlahan dari total massa partikel butiran air kabut dengan massa partikel butiran partikel gas seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.18). Sesuai dengan Tabel 2.7 pada sistem multikomponen bahwa $\sum_i x_i = 1$, sehingga dapat dihitung kecepatan rata-rata campuran partikel gas dan air kabut berdasarkan pada perbandingan massa dengan menggunakan persamaan (2.15). Nilai kecepatan rata-rata campuran partikel gas dan air kabut sebesar $5,26491 \times 10^{-4}$ m/s. Perhitungan kecepatan rata-rata telah dilampirkan pada Lampiran C. Total massa air yang berevaporasi dapat dihitung melalui perhitungan massa air yang berevaporasi dari satu butiran air berdasarkan *number of transfer unit* terhadap luas permukaan dan waktu kontak antara gas dan air. *Number of transfer unit* dapat dihitung menggunakan persamaan (2.18). Waktu kontak butiran air kabut dengan biogas sebesar 247 s yang diperoleh dengan membagi jarak kolom purifikasi sebesar 0,13 m terhadap kecepatan butiran air sebesar $5,27 \times 10^{-4}$ m/s .

Dengan demikian dapat diketahui total massa air yang berevaporasi sebesar $5,23 \times 10^{-4}$ kg/s, perhitungan terlampir pada Lampiran D. Setelah diperoleh total massa, dilakukan analisa waktu regenerasi air dalam kolom purifikasi. Perhitungan ini diperoleh nilai debit air yang mengalami evaporasi sebesar $5,23 \times 10^{-7}$ m³/s. Air di dalam tangki harus diregenerasi atau diganti tiap 3824,092 detik yang setara dengan 64 menit. Berdasarkan pada perhitungan tersebut, maka pergantian air yang ada di dalam tangki air direkomendasikan setiap 64 menit, agar fungsi air dalam alat purifikasi dapat lebih optimal. Hal tersebut dilakukan untuk menjaga kualitas air tetap baik dalam proses absorpsi serta lebih memudahkan pengguna alat purifikasi biogas untuk melakukan penjadwalan dalam pergantian air.

Performa filtrasi *wet scrubber* merupakan keefektifan pada *wet scrubber* saat beroperasi yang dihitung melalui proses impaksi. Impaksi adalah proses

gesekan butiran air dengan gas yang terjadi secara teratur berdasarkan ketentuan ukuran partikel yaitu $\geq 1 \mu\text{m}$. Performa *wet scrubber* dapat dihitung menggunakan persamaan (2.19) yang diperoleh sebesar 72,7%. Perhitungan telah dilampirkan pada Lampiran E.

Wet scrubber membuang partikel pengotor dari biogas dengan menangkap partikel menggunakan tetesan/butiran *liquid* (air) lalu memisahkan tetesan air tersebut dari arus gas. Beberapa variabel proses yang mempengaruhi penangkapan partikel yaitu ukuran partikel, ukuran droplet liquid dan kecepatan relatif partikel. Secara umum, partikel yang lebih mudah untuk ditangkap oleh air yaitu partikel yang memiliki ukuran lebih kecil. Faktor penting penangkapan partikel yang efektif pada *wet scrubber* adalah dengan menciptakan *droplet* kecil atau kabut yang bertindak sebagai target pengumpul. Semakin kecil *droplet* maka semakin banyak *droplet* yang diperoleh, sehingga semakin baik kemampuan *wet scrubber* untuk menangkap partikel berukuran kecil.

Untuk mengurangi unsur pengotor pada biogas, unsur pengotor tersebut harus mudah terlarut dalam liquid yang terpilih, seperti gas pengotor H_2S dengan air yang dapat terjadi karena H_2S mempunyai kelarutan yang tinggi dalam air. Untuk mengurangi unsur H_2S , sistem harus dirancang sedemikian rupa supaya dapat bekerja dengan baik terhadap pencampuran gas dan liquid. Pertimbangan lain yang cukup penting pada pengurangan unsur H_2S yaitu jumlah *liquid* yang digunakan atau diinjeksikan ke dalam scrubber per volume gas yang dihasilkan.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan pada hasil penelitian ini, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Alat purifikasi biogas yang didesain memiliki dimensi 75cm x 25cm x 95cm yang terdiri dari 1 *wet scrubber* dan 2 kolom adsorber. Sementara itu spesifikasi tinggi kolom *wet scrubber* 27 cm dan diameter 15,9 cm dengan kebutuhan daya nya sebesar 7,08 watt. Alat purifikasi menggunakan metode pengkabutan tersebut yang mampu mengurangi kadar H₂S.
2. Pengurangan yang lebih banyak diperoleh dari percampuran antara gas dan air dengan kecepatan biogas sebesar 0,69 m/s dan kecepatan air sebesar 5,24 . 10⁻⁴ m/s. Proses absorpsi biogas dapat mengurangi kadar H₂S sebesar 58%, sehingga performa scrubber yang dimiliki alat purifikasi pengkabutan ini sebagai alat pengurangan H₂S sebesar 72,7%. Air di dalam tangki yang disediakan untuk proses *wet scrubber* harus diregenerasi atau diganti tiap 3840 detik, atau setara dengan 64 menit. Berdasarkan pada perhitungan tersebut, maka pergantian air yang ada di dalam tangki air direkomendasikan setiap 60 menit sekali, agar fungsi air dalam alat purifikasi biogas dapat lebih optimal karena kualitas air yang terjaga, serta lebih memudahkan pengguna alat ini untuk melakukan penjadwalan dalam pergantian air.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Miltner, Makaruk, A. Bala, and M. Harasek, "Biogas upgrading for transportation purposes – Operational Experiences with Austria's first Bio-CNG fuelling station," *Biomass Conf. Exhib. Val.*, pp. 1905–1911, 2008.
- [2] A. Makaruk, M. Miltner, and M. Harasek, "Membrane biogas upgrading processes for the production of natural gas substitute," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 74, no. 1, pp. 83–92, 2010.
- [3] F. Osorio and J. C. Torres, "Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 2164–2171, 2009.
- [4] J. B. Holm-Nielsen, T. Al Seadi, and P. Oleskowicz-Popiel, "The future of anaerobic digestion and biogas utilization," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 22, pp. 5478–5484, 2009.
- [5] T. Abbasi, S. M. Tauseef, and S. A. Abbasi, "Anaerobic digestion for global warming control and energy generation - An overview," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 3228–3242, 2012.
- [6] S. Rasi, J. Lantela, and J. Rintala, "Trace compounds affecting biogas energy utilisation - A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 12, pp. 3369–3375, 2011.
- [7] N. Abatzoglou and S. Boivin, "A review of biogas purification processes," *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 3, pp. 42–71, 2009.
- [8] A. C. Bartocci, "High Efficiency SO₂ Scrubber Design to Reduce Caustic Consumption," *High Effic. SO₂ Scrubber Des. to Reduce Caustic Consum.*, vol. 35, pp. 1–12, 2016.
- [9] W.-C. Lin, Y.-P. Chen, and C.-P. Tseng, "Pilot-scale chemical-biological system for efficient H₂S removal from biogas," *Bioresour. Technol.*, vol. 135, pp. 283–291, 2013.
- [10] D. R. Shah and P. H. J. Nagarsheth, "Biogas Up Gradation using Water Scrubbing for its use in Vehicular Applications," *Issn*, vol. 2, no. 6, pp. 2393–2395, 2015.
- [11] K. Metty *et al.*, "Pemurnian Biogas Dari Gas Pengotor Hidrogen Sulfida (H₂ S) Dengan Memanfaatkan Limbah Geram Besi Proses Pembubutan," *Energi dan Manufaktur*, vol. 5, no. 1, pp. 33–41, 2012.
- [12] J. Krischan, A. Makaruk, and M. Harasek, "Design and scale-up of an oxidative scrubbing process for the selective removal of hydrogen sulfide from biogas," *J. Hazard. Mater.*, vol. 215–216, pp. 49–56, 2012.
- [13] C. O. Boateng and E. M. Knofie, "Water Scrubbing: A Better Option for Biogas Purification for Effective Storage," *World Appl. Sci. J*, vol. 5, pp. 122–125, 2009.
- [14] Z. Yong, Y. Dong, X. Zhang, and T. Tan, "Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production," *Renew. Energy*, vol. 78, pp. 527–530, 2015.
- [15] M. T. B. Fusun, Boysan, Cigdem Özer, Kagan Bakkaloglu, "Biogas Production from Animal Manure," *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 15, no. 6, pp. 908–911, 2015.

- [16] Keenan, W. Charles, and Pudjaatmaka, "Ilmu Kimia Universitas." p. Jakarta: Erlangga, 1999.
- [17] S. Wahyuni, "Biogas." p. PT. Penebar Swadaya. Jakarta, 2000.
- [18] T. Waldheim, L. Nilsson, "Heating value of gases from biomass gasification," *IEA Bioenergy Agreement, Task 20 - Therm. Gasif. Biomass*, no. May, 2001.
- [19] P. I. Frank and P. D. David, "Fundamentals of heat and mass transfer," *John Wiley Sons Aust. Ltd.*, 2002.
- [20] N. Nadliriyah and Triwikantoro, "Pemurnian Produk Biogas dengan Metode Absorpsi Menggunakan Larutan Ca(OH)_2 ," *Sains dan Seni Pomits*, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, 2013.
- [21] M. Balas, M. Lisy, J. Kubicek, and J. Pospisil, "Syngas cleaning by wet scrubber," *WSEAS Trans. Heat Mass Transf.*, vol. 9, no. 1, pp. 195–204, 2014.
- [22] Z. Alladany and M. Arrofiq, "Purwarupa Pemantau Gas Hidrogen Sulfida Dalam Ruang Industri Kimia," *Simp. Nas. PAPI XIII*, pp. 19–23, 2014.
- [23] M. Kampa and E. Castanas, "Human health effects of air pollution," *Environ. Pollut.*, vol. 151, no. 2, pp. 362–367, 2008.
- [24] W. J. Nock, M. Walker, R. Kapoor, and S. Heaven, "Modeling the water scrubbing process and energy requirements for CO_2 capture to upgrade biogas to biomethane," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 53, no. 32, pp. 12783–12792, 2014.
- [25] A. Abdurrakhman, T. Soehartanto, and B. Sudarmanta, "Rancang Bangun Alat Purifikasi Biogas dengan Menggunakan CaO dan Water Scrubber (Studi Kasus Plant Biogas ...)," *Semin. Nas. Pascasarj. XIII*, no. 15 Agustus, 2013.
- [26] S. S. Kapdi, V. K. Vijay, S. K. Rajesh, and R. Prasad, "Biogas scrubbing, compression and storage: Perspective and prospectus in Indian context," *Renew. Energy*, vol. 30, no. 8, pp. 1195–1202, 2005.
- [27] I. Watanabe, T. Nakamura, and J. Shima, "Characterization of a spontaneous flocculation mutant derived from *Candida glabrata*: A useful strain for bioethanol production," *J. Biosci. Bioeng.*, vol. 107, no. 4, pp. 379–382, 2009.
- [28] R. H. Perry and D. W. Green, "Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition," no. June, pp. 2007–2008, 2007.
- [29] T. K. Nguyen, "Absorption and Stripping," pp. 1–8, 2012.
- [30] A. Moharana, P. Goel, and A. K. Nayak, "Performance estimation of a venturi scrubber and its application to self-priming operation in decontaminating aerosol particulates," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 320, pp. 165–182, 2017.
- [31] P. T. D. N. Tipayawong*, "Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO_2 and H_2S in a packed column reactor," *Energy* 35, p. 4531e4535, 2010.
- [32] K. Woodard, "Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter," no. 68, p. 286, 1998.
- [33] L. S. Lebel, M. H. Piro, R. Maccoy, A. Clouthier, and Y. S. Chin, "Concept for a cyclonic spray scrubber as a fission product removal system for filtered containment venting," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 297, pp. 60–71, 2016.

- [34] R. Desai and O. P. Sahu, "Study of Venturi Scrubber Efficiency For Pesticide Industry," vol. 4, pp. 15–26, 2014.
- [35] K. Asano, *Mass Transfer*. Tokyo: WILEY-VCH, 2006.
- [36] USEPA, "Supplemental Guidance for Developing Soil Screening," *U.S. Environ. Prot. Agency*, no. December, p. 106, 2002.
- [37] Z. Chen, H. Wang, J. Zhuo, and C. You, "Experimental and numerical study on effects of deflectors on flow field distribution and desulfurization efficiency in spray towers," *Fuel Process. Technol.*, vol. 162, pp. 1–12, 2017.
- [38] S. Roy and J. Chattopadhyay, "Towards a resolution of 'the paradox of the plankton': A brief overview of the proposed mechanisms," *Ecol. Complex.*, vol. 4, no. 1–2, pp. 26–33, 2007.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A

KECEPATAN ALIRAN AIR

Kolom air berdiameter 0,78 m, dan volume air sebanyak 2 liter.

$$\dot{V} = 1,5 \text{ ml/menit}$$

$$\dot{V} = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{60} = 2,5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$$

Sehingga kecepatan aliran massa air yang terdistribusi adalah :

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$$

Dengan : ρ air = 1000 kg/m³

Maka :

$$\dot{m} = 1000 \cdot 2,5 \cdot 10^{-8} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$$

Luas penampang keluaran air adalah :

$$A_i = \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2$$

$$A_i = \frac{\pi}{4} \cdot (7,8 \cdot 10^{-3})^2 = 4,77 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Maka dapat dihitung kecepatan aliran air, yaitu:

$$v = \frac{\dot{V}}{A_i}$$

$$v = \frac{2,5 \times 10^{-8}}{4,77 \cdot 10^{-5}} = 5,24 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B

KECEPATAN RATA-RATA BUTIRAN AIR DAN GAS

kecepatan awal butiran air adalah $v_0 = 5,24 \cdot 10^{-4}$ m/s, maka Reynold Number (Re) dari butiran air dapat dihitung sebagai berikut :

$$Re_A = \frac{\rho_G \cdot d_A \cdot v_0}{\mu_G}$$

Keterangan :

Re_A : Reynold Number butiran air

ρ_G : densitas biogas dalam kolom (kg/m^3) ; $\rho_G = 1,2 \text{ kg/m}^3$

d_A : diameter butiran air (m)

v_0 : kecepatan awal butiran air yang keluar dari nozzle (m/s)

μ_G : viskositas biogas di dalam kolom (Pa.s) ; $\mu_G = 0,0001027 \text{ poise} = 1,027 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Selanjutnya diambil sebuah asumsi bahwa butiran air (kabut) yang terjadi adalah $10 \mu\text{m}$, maka :

$$Re_A = \frac{1,2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 5,24 \cdot 10^{-4}}{1,027 \cdot 10^{-4}} = 6,12 \times 10^{-5}$$

$$C_A = \frac{24}{Re_A} (1 + 0,125 \cdot Re_A^{0,72})$$

$$C_A = \frac{24}{3,06 \cdot 10^{-4}} (1 + 0,125 \cdot (3,06 \cdot 10^{-4})^{0,72})$$

$$C_A = 3,92 \cdot 10^5$$

$$v_\infty = \left(\frac{4(\rho_A - \rho_G)d_A g}{3\rho_G \cdot C_A} \right)^{0,5}$$

Sehingga kecepatan rata-rata butiran air adalah :

$$v_\infty = \left(\frac{4(\rho_A - \rho_G)d_A g}{3\rho_G \cdot C_A} \right)^{0,5}$$

$$v_\infty A = \left(\frac{4(1000 - 1,2)10 \cdot 10^{-6} \cdot 9,81}{3 \cdot 1,2 \cdot 3,92 \cdot 10^5} \right)^{0,5}$$

$$v_\infty A = 5,27 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Kecepatan Rata-rata Butiran Partikel Biogas

Kondisi kecepatan rata-rata partikel dalam aliran fluida diasumsikan sama dengan kecepatan aliran biogas yang mengalir menuju kolom purifikasi, yaitu sebesar 0,695 m/s. Sehingga dapat dihitung properti dari partikel sebagai berikut :

$$R_{ep} = \frac{\rho_G \cdot d_p \cdot v_0}{\mu_G}$$

Keterangan :

R_{ep} : Reynold Number butiran partikel

ρ_G : densitas biogas dalam kolom (kg/m^3) ; $\rho_G = 1,2 \text{ kg/m}^3$

d_p : diameter butiran partikel (m)

v_0 : kecepatan awal butiran partikel yang mengalir di dalam kolom purifikasi (m/s)

μ_G : viskositas biogas di dalam kolom (Pa.s) ; $\mu_G = 0,0001027 \text{ poise} = 1,027 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Untuk ukuran butiran partikel gas dengan diameter 1 μm , maka :

$$R_{ep} = \frac{1,2 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,695}{1,027 \cdot 10^{-4}} = 8,12 \times 10^{-3}$$

$$C_p = \frac{24}{R_{ep}} (1 + 0,125 \cdot R_{ep}^{0,72})$$

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{24}{8,12 \times 10^{-3}} (1 + 0,125 \cdot (8,12 \times 10^{-3})^{0,72}) \\ &= 2966,67 \end{aligned}$$

Adapun densitas dari butiran partikel gas (ρ_p) diketahui sebesar 1,29 kg/m^3 , Sehingga kecepatan rata-rata butiran gas adalah :

$$v_{\infty p} = \left(\frac{4(\rho_p - \rho_G)d_p g}{3\rho_G C_p} \right)^{0,5}$$

$$v_{\infty p} = \left(\frac{4(1,29 - 1,2) \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 9,81}{3 \cdot 1,2 \cdot 2966,67} \right)^{0,5} = 1,82 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

LAMPIRAN C

KECEPATAN RATA-RATA CAMPURAN AIR DAN GAS

Untuk menghitung kecepatan rata-rata campuran partikel dengan butiran air, digunakan perbandingan massa. Untuk gabungan partikel air berukuran 10 μm dengan butiran partikel gas yang berukuran 1 μm , maka :

$$m_{\text{total}} = m_p + m_A$$

$$m_{\text{total}} = \rho_p \cdot \frac{\pi}{6} D_p^3 + \rho_A \cdot \frac{\pi}{6} D_A^3$$

$$m_{\text{total}} = 1,29 \cdot \frac{\pi}{6} (1 \cdot 10^{-6})^3 + 1000 \cdot \frac{\pi}{6} (10 \cdot 10^{-6})^3$$

$$m_{\text{total}} = 5,23 \times 10^{-13} \text{ kg}$$

Tabel Hubungan Antara Variasi Konsentrasi pada Sistem Multikomponen

	Fraaksi Massa $\omega_A [-]$	Fraaksi Mol $x_A [-]$	Densitas parsial $\rho_A [\text{kgm}^{-3}]$	Molar density $c_A [\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}]$	Tekanan Parsial $p_A [\text{kPa}]$
Fraaksi Massa $\omega_A [-]$	ω	$\frac{x_A M_A}{\sum_i x_i M_i}$	$\frac{\rho_A}{\sum_i \rho_i}$	$\frac{c_A M_A}{\sum_i c_i M_i}$	$\frac{\rho_A M_A}{\sum_i \rho_i M_i}$
Fraaksi Massa $\omega_A [-]$	$\frac{(\omega_A / M_A)}{\sum_i (\omega_i / M_i)}$	x_A	$\frac{\rho_A / M_A}{\sum_i (\rho_i / M_i)}$	$\frac{c_A}{\sum_i c_i}$	$\frac{\rho_A}{\sum_i \rho_i}$
Densitas Parsial $\rho_A [\text{kgm}^{-3}]$	$\rho \omega_A$	$\frac{\rho x_A M_A}{\sum_i x_i M_i}$	ρ_A	$c_A M_A$	$\frac{M_A \rho_A}{RT}$
Densitas Molar $c_A [\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}]$	$\frac{\rho \omega_A}{M_A}$	$c x_A$	$\frac{\rho_A}{M_A}$	c_A	$\frac{\rho_A}{RT}$
Tekanan Parsial $p_A [\text{kPa}]$	$\frac{(\omega_A / M_A) p}{\sum_i (\omega_i / M_i)}$	$p x_A$	$\frac{RT \rho_A}{M_A}$	$c_A RT$	p_A
$\sum_i x_i = 1, \sum_i \omega_i = 1, \rho = \sum_i \rho_i, c = \sum_i c_i, P = \sum_i p_i, M = \sum_i M_i x_i = \left(\sum_i \frac{\omega_i}{M_i} \right)^{-1}$					

Dari tabel diatas dapat diketahui bahwa : $\sum_i x_i = 1$, maka selanjutnya dihitung kecepatan rata-rata campuran partikel dan air berdasarkan pada perbandingan massa sebagai berikut:

$$v_{campuran} = \sum x_i \cdot v_i$$

$$v_{campuran} = (0,001 \cdot 1,82 \cdot 10^{-5}) + (0,999 \cdot 5,27 \cdot 10^{-4})$$

$$v_{campuran} = 5,26491 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

LAMPIRAN D

MASSA AIR YANG BEREVAPORASI

Total massa air yang berevaporasi dapat dihitung melalui perhitungan massa air yang berevaporasi dari satu butiran air dihitung berdasarkan :

$$M_{A(\text{evap})} = \text{Luas permukaan} \cdot NA \cdot t$$

Keterangan :

$$NA : \text{Number of Transfer Unit } \left(\frac{kg}{m^2} \cdot s^{-1} \right)$$

t : waktu kontak (s)

dimaana:

$$N_A = \frac{sh \cdot (1 - \omega) \cdot \rho_g \cdot D}{d_A} \cdot \left(\frac{\omega}{1 - \omega} \right)$$

$$Sh \cdot (1 - \omega) = 2 + 0,6 \cdot Sc^{1/3} \cdot Re^{1/2}$$

$$D = \frac{kTC_c}{3\pi\mu_G d_A} ; C_c = 1 + \frac{(6,21 \cdot 10^{-4}) \cdot T}{d_A}$$

Keterangan:

Sh : *Sherwood Number* butiran air

D : difusifitas butiran air dengan biogas (m²/s)

d_A : diameter butiran air (m)

ω : *specific humidity* (kg H₂O / kg udara kering)

Sc : *Schmidt Number* butiran air

Re : *Reynold Number* butiran air

k : konstanta Boltzmann = 1,381 · 10⁻²³ J/°K

C_c : *Cunningham Slip Correction Factor*

Temperatur air diasumsikan merupakan wet bulb temperature, dimana dari tabel psikometri, pada T_{wb} = 300,15 °K, didapatkan ω = 0,023, sehingga untuk butiran air yang diasumsikan didistribusikan merata dengan ukuran partikel air sebesar 10 μm (Re = 6,11 x 10⁻¹⁰), maka :

$$C_c = 1 + \frac{(6,21 \cdot 10^{-4}) \cdot T}{d_A}$$

$$C_c = 1 + \frac{(6,21 \cdot 10^{-4}) \cdot 300,15}{10 \cdot 10^{-6}} = 1,86 \cdot 10^4$$

Sehingga :

$$D = \frac{kTC_c}{3\pi\mu_G d_A}$$

$$D = \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 300,15 \cdot 1,86 \cdot 10^4}{3\pi \cdot 1,027 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}$$

$$D = 7,97 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

Selanjutnya dihitung *Schmidt Number* butiran air sebagai berikut :

$$S_c = \frac{\mu_G}{\rho_G \cdot D}$$

$$S_c = \frac{1,027 \cdot 10^{-4}}{1,2 \cdot 7,97 \cdot 10^{-9}}$$

$$S_c = 1,07 \cdot 10^4$$

Sehingga:

$$Sh \cdot (1 - \omega) = 2 + 0,6 \cdot S_c^{1/3} \cdot Re_A^{1/2}$$

$$Sh \cdot (1 - 0,023) = 2 + 0,6 \cdot (1,07 \cdot 10^4)^{1/3} \cdot (6,12 \times 10^{-5})^{1/2}$$

$$Sh = 2,153$$

Maka :

$$N_A = \frac{Sh \cdot (1 - \omega) \cdot \rho_g \cdot D}{d_A} \cdot \left(\frac{\omega}{1 - \omega} \right)$$

$$N_A = \frac{2,153 \cdot (1 - 0,023) \cdot 1,2 \cdot 7,97 \cdot 10^{-9}}{10 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{0,023}{1 - 0,023} \right)$$

$$N_A = 4,6 \cdot 10^{-5}$$

Sehingga dapat dihitung massa air berevaporasi adalah:

$$M_{A(\text{evap})} = \text{Luas permukaan} \cdot N_A \cdot t$$

$$\text{Dimana } t = \frac{s}{v_{\infty A}}$$

Keterangan :

t : waktu kontak butiran air dengan biogas (sekon)

s : jarak yang ditempuh oleh butiran air pada saat melintasi gas, yang diambil jarak maksimum panjang kolom purifikasi di atas permukaan air, yaitu 0,13 m

$v_{\infty A}$: kecepatan rata-rata butiran air = $5,27 \cdot 10^{-4}$ m/s

$$\text{Jadi, } t = \frac{0,13}{5,27 \cdot 10^{-4}} = 247 \text{ s}$$

Untuk perhitungan luas permukaan air sebagai berikut :

$$\text{Luas permukaan} = \pi \cdot d_A^2 = \pi \cdot (10 \cdot 10^{-6})^2 = 3,14 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$$

Sehingga:

$$m_a (\text{evap}) = 3,14 \cdot 10^{-10} \cdot N_A \cdot 247$$

$$m_a (\text{evap}) = 3,14 \cdot 10^{-10} \cdot 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot 247$$

$$m_a (\text{evap}) = 3,57 \cdot 10^{-12}$$

Selanjutnya dapat dihitung massa air yang berevaporasi berdasarkan massa satu butiran air, yaitu :

$$m_A = \frac{\pi}{6} \cdot d_A^3 \cdot \rho_A$$

$$m_A = \frac{\pi}{6} \cdot (10 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 1000 = 5,23 \cdot 10^{-13}$$

maka total jumlah butiran air yang berevaporasi adalah

$$n = \frac{v_0}{m_A}$$

$$n = \frac{5,24 \cdot 10^{-4}}{5,23 \cdot 10^{-13}}$$

$$n = 10 \cdot 10^6 \text{ butir air / detik}$$

sehingga total massa air yang berevaporasi adalah:

$$\dot{m}_{total} = n \cdot m_A = 10 \cdot 10^6 \cdot 5,23 \cdot 10^{-13}$$

$$\dot{m}_{total} = 5,23 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$$

LAMPIRAN E

PERFORMA SCRUBBER

Performa filtrasi partikel merupakan efisiensi wet scrubber yang dihipotiskan dari efisiensi filtrasi impaksi, intersepsi, dan difusi, dengan ketentuan untuk densitas partikel $\neq 1$ gr/cm³, maka total keseluruhan efisiensi dikalikan dengan

$(\frac{\rho_A}{\rho_p})^{1/2}$ [37]. Menggunakan persamaan di bawah ini :

$$\eta_{total} = \frac{8}{R_e S_c} \left\{ 1 + \frac{0,4}{\sqrt{2}} R_e^{1/2} S_c^{1/3} + \frac{0,16}{\sqrt{2}} R_e^{1/2} S_c^{1/2} \right\} + 4k \{ \omega^{-1} + (1 + \sqrt{2} R_e^{1/2}) k \} \\ + \left\{ \frac{2S_t - S_*}{2S_t - S_* + \frac{2}{3}} \right\}^{3/2}$$

Dimana:

$$S_* = \frac{1,2 + \frac{1}{2} \ln(1 + \frac{R_e}{2})}{1 + \ln(1 + \frac{R_e}{2})}$$

$$\text{Stoke Number partikel berdasarkan} : S_t = \frac{C_c \cdot \rho_p \cdot d_p^2 \cdot v_{tA}}{18 \cdot \mu_G \cdot d_A}$$

$$\text{Reynold Number partikel berdasarkan} : Re = \frac{\rho_G \cdot d_A \cdot v_{tA}}{\mu_G}$$

$$\text{Schmidt Number partikel berdasarkan} : S_c = \frac{\mu_G}{\rho_G \cdot D}$$

$$\text{Rasio densitas} : k = \frac{d_p}{d_A}$$

$$\text{Rasio viskositas} : \omega = \frac{\mu_A}{\mu_G}$$

Keterangan :

C_c : *Cunningham Slip Correction Factor*

d_p : diameter partikel (m)

d_A : diameter butiran air (m)

v_{tA} : kecepatan relatif butiran air (m/s)

μ_G : viskositas biogas (kg/m.s)

ρ_p : densitas partikel (kg/m³)

ρ_G : densitas biogas (kg/m³)

D : koefisien difusifitas (m²/s)

T : temperatur partikel dalam kolom biogas (°K)

Sehingga total efisiensi berdasarkan tiap koleksi untuk partikel 1 µm dan butiran air sebesar 10 µm adalah

$$R_s = \frac{\rho_G \cdot d_A \cdot v_{tA}}{\mu_G}$$

Dimana : $v_{tA} = U_{sd} - U_{si}$

Keterangan:

U_{sd} : kecepatan relatif butiran air terhadap aliran biogas

U_{si} : kecepatan rata-rata partikel pada aliran biogas

Sehingga:

$$v_{ta} = (v_A + v_G) - v_p$$

$$v_{tA} = (5,27 \cdot 10^{-4} + 1,36) - 27 \cdot 10^{-5}$$

$$v_{tA} = 1,36 \text{ m/s}$$

Maka:

$$Re = \frac{\rho_G \cdot d_A \cdot v_{tA}}{\mu_G}$$

$$R_e = \frac{1,2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 1,36}{1,027 \cdot 10^{-4}} = 0,16$$

Selanjutnya dihitung *Schmidt Number* partikel sebagai berikut :

$$S_c = \frac{\mu_G}{\rho_G \cdot D}$$

Dimana:

$$C_c = 1 + \frac{(6,21 \cdot 10^{-4}) \cdot T}{d_p}$$

$$C_c = 1 + 1 \frac{(6,21 \cdot 10^{-4}) \cdot 300,15}{1 \cdot 10^{-6}} = 1,86 \cdot 10^5$$

$$D = \frac{kTC_c}{3\pi\mu_G d_A}$$

$$D = \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 300,15 \cdot 1,86 \cdot 10^4}{3\pi \cdot 1,027 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}} = 7,97 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

Sehingga:

$$S_c = \frac{\mu_G}{\rho_G \cdot D} = \frac{1,027 \cdot 10^{-4}}{1,2 \cdot 7,97 \cdot 10^{-9}} = 1,07 \cdot 10^4$$

$$\omega = \frac{d_p}{d_A} = \frac{0,798 \cdot 10^{-3}}{1,027 \cdot 10^{-4}} = 7,77$$

$$k = \frac{d_p}{d_A} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-6}} = 0,1$$

sehingga:

$$S_t = \frac{C_c \cdot \rho_p \cdot d_p^2 \cdot v_{tA}}{18 \cdot \mu_G \cdot d_A}$$

$$S_t = \frac{1,86 \cdot 10^5 \cdot 2500 \cdot (1 \cdot 10^{-6}) \cdot 1,36}{18 \cdot 1,027 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}$$

$$S_t = 3,42 \cdot 10^4$$

$$S^* = \frac{1,2 + \frac{1}{2} \ln(1 + \frac{R_e}{2})}{1 + \ln(1 + \frac{R_e}{2})}$$

$$S^* = \frac{1,2 + \frac{1}{2} \ln(1 + \frac{0,16}{2})}{1 + \ln(1 + \frac{0,16}{2})} = 1,15$$

Maka:

$$\eta_{\text{total}} = \frac{8}{R_e S_c} \left\{ 1 + \frac{0,4}{\sqrt{2}} R_e^{1/2} S_c^{1/3} + \frac{0,16}{\sqrt{2}} R_e^{1/2} S_c^{1/2} \right\} + 4k \{ \omega^{-1} + (1 + \sqrt{2} R_e^{1/2}) k \} \\ + \left\{ \frac{2S_t - S^*}{2S_t - S^* + \frac{2}{3}} \right\}^{3/2}$$

$$\eta_{\text{total}} = \frac{8}{0,16 \cdot 1,07 \cdot 10^4} \left\{ 1 + \frac{0,4}{\sqrt{2}} \cdot 0,16^{1/2} \cdot (1,07 \cdot 10^4)^{1/3} + \frac{0,16}{\sqrt{2}} \cdot 0,16^{1/2} \cdot (1,07 \cdot 10^4)^{1/2} \right\} \\ + 4 \cdot 0,1 \{ 7,77^{-1} + (1 + \sqrt{2} \cdot 0,16^{1/2}) 0,1 \} + \left\{ \frac{2,3,41 \cdot 10^{-4} - 1,15}{2,3,42 \cdot 10^4 - 1,15 + \frac{2}{3}} \right\}^{3/2}$$

$$\eta_{\text{total}} = 1,15$$

Sehingga total efisiensi wet scrubber dengan kondisi densitas biogas $\neq 1$ gr/cm³ adalah :

$$\eta_{\text{total-scrubber}} = 1,15 \cdot \left(\frac{\rho_A}{\rho_P} \right)^{1/2}$$

$$\eta_{\text{total-scrubber}} = 1,15 \cdot \left(\frac{1000}{2500} \right)^{1/2}$$

$$\eta_{\text{total-scrubber}} = 0,727 = 72,7 \%$$

DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS

ANITA CATUR TRISNAYANTI



Jalan Apel No 607 RT.02 RW.05 Kel. Kidul Dalem,
Kec. Bangil, Kab. Pasuruan, Jawa Timur (67153)
HP: +62 857 55403235

email: anitacaturtrisnayanti@gmail.com

TTL : Pasuruan, 9 April 1992

Bahasa : Bahasa Indonesia

Bahasa Inggris, EFL Score: 477

Pendidikan

- Agustus 2015 – Agustus 2017 **S2 Teknik Fisika**
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS),
Surabaya-Indonesia
Rekayasa Energi Terbarukan
IPK: 3,60 dari 4,00
Judul: Analisis Absorpsifitas Gas H₂S pada
Filter Purifikasi Biogas dengan Menggunakan
Wet Scrubber
Pembimbing: **Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA**
- Agustus 2010 – Agustus 2014 **D4 Teknik**
Politeknik Negeri Jember,
Jember-Indonesia
Teknik Energi Terbarukan
IPK: 3,58 dari 4,00
Judul: Pemanfaatan Garam (NaCl) sebagai
Media Sel Surya Kering dengan variasi
Kepekatan Elektrolit dan Luasan Elektroda
Pembimbing: **Mokhammad Nuruddin, ST,**
MSi dan Ir. Michael Joko Wibowo, MT

Konferensi

Agustus 2017. *Absorption Analysis of Gas H₂S on Biogas Purification Filter Using Wet Scrubber*. The 3rd International Seminar on Science and Technology (ISST) 2017. Surabaya

Reference

Dr. Totok Soehartanto

Energy and Instrumentation Engineering, Dept. of Engineering Physics – ITS
totokstf@yahoo.com